



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

METODIKA ODMAGNETOVÁNÍ PÍSTU SPORTOVNÍHO
MAGNETOREOLOGICKÉHO TLUMIČE
METHODOLOGY OF MAGNETORHEOLOGICAL SPORT DAMPER DEMAGNETIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ STRMISKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZBYNĚK STRECKER, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Strmiska

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Metodika odmagnetování pístu sportovního magnetoreologického tlumiče

v anglickém jazyce:

Methodology of magnetorheological sport damper demagnetization

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je nalezení rychlé metody odmagnetování pístu magnetoreologického tlumiče.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, laboratorní protokol, digitální data

Typ práce: experimentální; Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2015.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

SMYTHE, W.R. Static and Dynamic Electricity. USA: McGraw-Hill, Inc., 1968. ISBN 978-0070594203.

TAKÁCS, J., Gy. KOVÁCS a L.K. VARGA. The external demagnetizing factor and the static characteristic loop. Physica B: Condensed Matter. 2012, roč. 407, č. 13, s. 2434-2437. DOI: 10.1016/j.physb.2012.03.041. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0921452612002979>

Aharoni, Amikam. "Demagnetizing factors for rectangular ferromagnetic prisms." Journal of Applied Physics vol. 83, issue 6 (1998): 3432-.

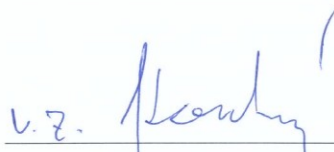
Brož, Jaromír. Základy magnetických měření. Praha: Nakladatelství české akademie věd, 1953.

Tischer, Zdeněk. Vlastnosti a použití magnetických materiálů. Praha: SNTL, 1975.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.


Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 21. 11. 2014



prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu





doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá hledáním ideálních metod odmagnetování. V úvodu je nastíněna problematika magnetoreologických (MR) tlumičů. Dále je z dostupných zdrojů zjišťováno, jaké jsou vhodné způsoby demagnetizace. Je sestaven a popsán měřicí řetězec, pomocí kterého jsou hledány nejvhodnější způsoby odmagnetování pístu MR tlumiče a magnetického obvodu MR viskozimetru. Výstupem práce je analýza zaznamenaných dat včetně vyhodnocení vlivu všech popsanych parametrů a určení nejvýhodnějšího nastavení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologický (MR) tlumič, rychlé odmagnetování, magnetická hystereze

ABSTRACT

This thesis is dedicated to discovering the most efficient methods of demagnetization. At the beginning, basics of magnetorheological (MR) dampers are explained. Available literature is studied to propose appropriate methods of demagnetization. An apparatus is designed and utilized to research methods of MR damper piston and magnetic circuit of MR viscometer demagnetization. The outcome of this work is analysis of recorded data including impact analysis of all identified parameters. The best demagnetization methods are described.

KEY WORDS

Magnetorheological (MR) damper, fast demagnetization, magnetic hysteresis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRMISKA, T. *Metodika odmagnetování pístu sportovního magnetoreologického tlumiče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Metodika odmagnetování pístu sportovního magnetoreologického tlumiče* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zbyňka Streckera, Ph.D. a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu Ing. Zbyňku Streckerovi, Ph.D., díky jehož odborné pomoci mohla být tato práce realizována. Dále bych chtěl poděkovat i jeho kolegům, kteří mě podporovali při experimentálním měření. V neposlední řadě děkuji rodině za to, že mi umožnila studium.

OBSAH

1 ÚVOD	12
1.1 Magnetoreologické tlumiče	12
1.1.1 Magnetoreologická kapalina	13
1.1.2 Elektromagnetická regulace	13
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO POZNÁNÍ	14
2.1 Aplikace elektromagnetického odmagnetování	14
2.2 Magnetická hystereze a saturace	14
2.3 Metody elektromagnetického odmagnetování	15
2.3.1 Metody určení zbytkového magnetismu	15
2.3.2 Parametry cívek	16
2.3.3 Parametry demagnetizačního signálu	17
2.3.4 Realizace proudu	19
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	20
4 MATERIÁL A METODY	22
4.1 Realizace měřicího řetězce	22
4.1.1 Software	23
4.2 Zkoumané průběhy	24
4.3 Analýza naměřených dat	25
5 VÝSLEDKY	27
5.1 Volba tvaru průběhu	28
5.2 Zkoumání offsetu	31
5.3 Maximální amplituda	33
5.4 Hledání ideálního průběhu	35
5.4.1 Zkoumání remanence pístu	35
5.4.2 Zkoumání remanence obvodu reometru	36
6 DISKUZE	39
7 ZÁVĚR	40
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	41
9 SEZNAMY OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK	43
9.1 Seznam obrázků	43
9.2 Seznam grafů	43
9.3 Seznam tabulek	43
10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	44
10.1 Seznam použitých zkratk	44
10.2 Seznam použitých symbolů	44
11 SEZNAM PŘÍLOH	45

1 ÚVOD

Velká část populace vyspělých států prakticky každodenně využívá motorových silničních dopravních prostředků, aby se snadněji a rychleji přesunuli, kam potřebují. Pohodlnost jízdy, kromě mnoha jiných parametrů, závisí na stavu cest a na kvalitě odpružení vozidla. Konstrukteři podvozků přitom musí počítat s nedokonalou vozovkou, protože většina vozů se s ní musí vypořádávat při každé jízdě.



Obr. 1 Nekvalitní asfaltový povrch silnice nižší třídy [1]

Správné nastavení parametrů podvozku je však komplexní úkol, protože návrháři kromě pohodlí přepravovaných osob musí zohledňovat i jízdní parametry, zejm. stabilitu a ovladatelnost vozidla při jízdě po povrchu s nerovnostmi. Pro konvenční konstrukce podvozků automobilů přitom platí, že většího komfortu bývá dosaženo relativně měkčím odpružením a nižším tlumením a naopak lepších jízdních vlastností je dosahováno relativně tvrdším odpružením a větším tlumením. Požadavky na optimální nastavení se však mění s rychlostí, stylem jízdy i s vlastnostmi vozovky [2].

Řešením je možnost měnit charakteristiky odpružení, či alespoň tlumičů, během samotné jízdy. Tímto problémem se výzkumníci zabývají již desítky let. Změna tlumení může být dosahována hydromechanickou regulací – ta je však relativně pomalá a součásti regulačních mechanismů jsou náchylné na opotřebení. Lepších provozních výsledků mohou dosahovat magnetoreologické (MR) tlumiče.

1.1 Magnetoreologické tlumiče

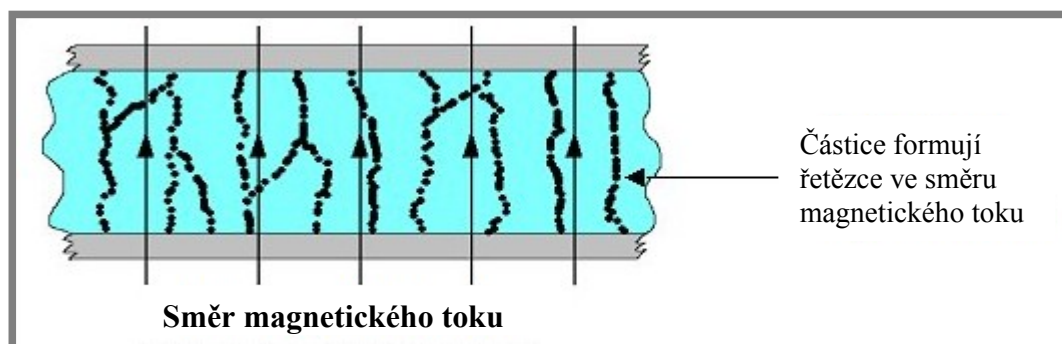
Tlumiče, které mění svoje charakteristiky aplikací magnetického pole na magneticky citlivé kapaliny (tzv. magnetoreologické kapaliny), které obsahují ve svém válci místo standardního oleje, nazýváme semiaktivními MR tlumiči. Mezi jejich hlavní výhody patří jednoduchá konstrukce, krátká reakční doba a regulace s velkým rozsahem (je možné dosahovat i velkých tlumících sil). Díky tomu, že regulovaná tlumící síla není na rozdíl od aktivních systémů vytvářena přímo, ale podobně jako u standardních automobilních tlumičů kapalinou procházející úzkými otvory, mají magnetoreologické tlumiče také relativně malou spotřebu energie [3]. Navíc i v případě selhání regulace dochází k omezenému tlumení odpovídajícímu neaktivovanému stavu, takže jsou řazeny mezi tzv. fail-safe systémy.

Zřejmě nejúspěšnější firmou ve vývoji magnetoreologických tlumičů je Delphi Automotive PLC, jejíž systém MagneRide™ je instalován např. na některých modelech sportovních automobilů Audi TT nebo Ferrari 599 GTB [4].

1.1.1 Magnetoreologická kapalina

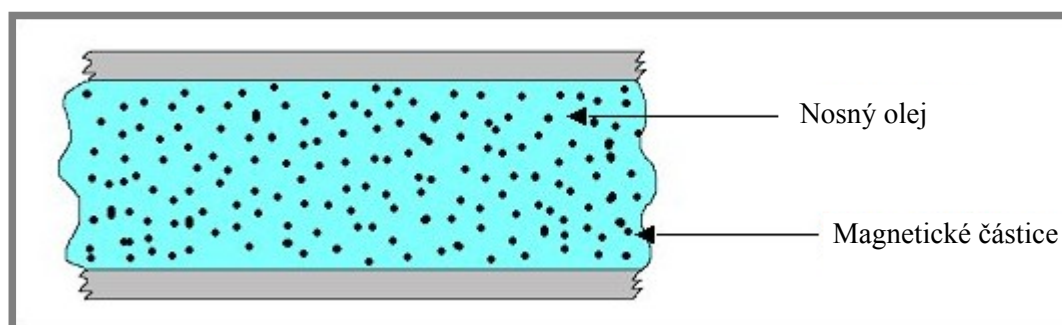
1.1.1

Možnost rychlé a přesné regulace viskozity pracovní kapaliny je základem funkce MR tlumičů. Zvýšení viskozity je dosahováno působením magnetického pole na mikročástice rozpuštěné v nosném oleji [5].



Obr. 2 MR kapalina v aktivním stavu [6]

Pokud pole přestane na částice působit, řetězce dle obr. 2 se rozdělí a viskozita poklesne na minimální hodnotu – tento stav je schematicky znázorněn na obr. 3.



Obr. 3 MR kapalina v pasivním stavu [7]

Vlivem vyšší měrné hmotnosti kovových částic oproti kapalině dochází zejm. za klidu (při absenci proudění a magnetického působení) k jejich postupné sedimentaci. Do MR kapalin se proto přidávají různá aditiva, aby zpomalila usazování a bránila nežádoucímu seskupování částic [5].

1.1.2 Elektromagnetická regulace

1.1.2

Viskozita MR kapaliny je závislá na intenzitě magnetického pole, které je generováno elektrickým proudem protékajícím cívkou - ta bývá zabudována v pístu tlumiče. Feromagnetickým materiálem je vzniklé pole usměrňováno a zesilováno, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů. Takový materiál ovšem má některé nežádoucí vlastnosti, např. i po vyjmutí z vnějšího pole může samostatně působit jako permanentní magnet. To snižuje využitelný rozsah MR zařízení, protože není možné dosáhnout zcela neaktivního stavu. Proto se bude tato práce zabývat hledáním nejvhodnějších metod odstraňování tohoto zbytkového magnetismu.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO POZNÁNÍ

Odmagnetováním součásti se rozumí zeslabení magnetického pole, které kolem sebe vytváří tak, aby bylo v nepřítomnosti vnějšího magnetického pole co nejslabší. Úplného odmagnetování lze dosáhnout ohřevem součásti nad Curieovu teplotu (např. 768 °C pro čisté železo). To však je zdoluhavé, často nevhodné (poškození struktury materiálu, nebezpečí oxidace povrchu) či nemožné (pokles hodnot mechanických vlastností by mohl vést k nehodě při ohřevu částí konstrukce nebo jsou součásti příliš velké, aby bylo možné aplikovat ohřev) a nevýhodné (velké energetické náklady). Z těchto důvodů se začalo využívat odmagnetování magnetickým polem elektromagnetů, které je rychlé a energeticky relativně nenáročné.

2.1 Aplikace elektromagnetického odmagnetování

Nalezení efektivních metod elektromagnetického odmagnetování začalo být nutností spolu s nárůstem využití systémů funkčních na základě síly magnetického pole. Mezi historicky první aplikace patří ochrana lodí proti magnetickým námořním minám během druhé světové války, které se jinak aktivovaly vlivem přirozeného magnetického pole země mnohonásobně zesíleného feromagnetickým materiálem trupu lodě [8]. V té době také docházelo k rychlému vývoji metod záznamu dat na magnetické pásky, který přinesl potřebu přesně regulovat sílu magnetického pole záznamové hlavy. V dnešní době je to stejné vyžadováno u čtecích/záznamových hlav počítačových pevných disků (HDD). Odmagnetování se kromě toho využívá například také v CRT obrazovkách, u kterých by vliv magnetického pole (nejčastěji zemského) mohl způsobit zhoršení kvality obrazu [9].

V některých případech je výhodné odmagnetovat jednotlivé součástky před jejich montáží, zvláště pokud je nutné zamezit adhezi kovových nečistot, zlepšit výsledky galvanizace nebo předejít problémům při svařování [10].

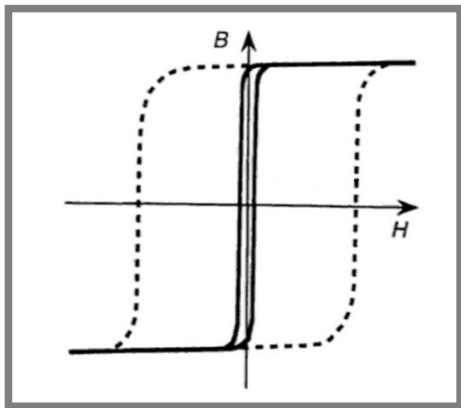
2.2 Magnetická hystereze a saturace

Elektromagnet se zpravidla skládá z elektrické cívky a feromagnetického jádra. Sílu magnetického pole cívky bez vlivu prostředí popisuje fyzikální veličina intenzita magnetického pole H [$A \cdot m^{-1}$], kterou je možné vypočítat z konstrukčních parametrů cívky a protékajícího elektrického proudu. Výsledná naměřená síla magnetického pole elektromagnetu se nazývá magnetická indukce B [T] a kromě H závisí i na magnetické permeabilitě jádra μ [$N \cdot A^{-2}$]. Platí $B = \mu \cdot H$.

Magnetická permeabilita je schopnost látky zesilovat vnější magnetické pole. Pro většinu látek je její hodnota téměř konstantní a přibližně stejná jako μ vakua ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} N \cdot A^{-2}$), s výjimkou feromagnetických látek, které vykazují mnohonásobně větší a nekonstantní μ . Z toho důvodu se zavádí relativní magnetická permeabilita $\mu_r = \mu/\mu_0$. Pro běžná feromagnetická jádra se pohybuje v tisících, pro speciální tepelně zpracované slitiny může dosáhnout i milionu [11]. S nárůstem intenzity magnetického pole se však v určitém bodě zmírní nárůst magnetické indukce – tomuto jevu říkáme saturace feromagnetického materiálu.

Další vlastností feromagnetických látek je uchování části magnetické indukce i po odstranění vnějšího magnetického pole. To je principem funkce permanentních magnetů, u elektromagnetů je to většinou nežádoucí. Intenzitu magnetického pole potřebnou k anulování magnetické indukce saturevaně zmagnetizovaného materiálu nazýváme koercitivní síla H_c [$A \cdot m^{-1}$]. Feromagnetické materiály s velkou koercitivní silou nazýváme magneticky tvrdé ($H_c \approx 10^3 \div 10^9 A \cdot m^{-1}$), s malou magneticky

měkké ($H_c \approx 10^{-1} \div 10^3 \text{ A.m}^{-1}$) – jejich porovnání je na obr. 4. Magnetická indukce je tedy závislá na předchozích stavech intenzity pole a není nulová po odstranění pole – dochází k magnetické hysterezi.



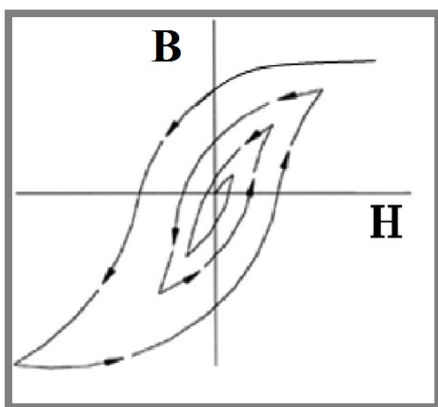
Obr. 4 B-H křivka magneticky měkkého (souvislá čára) a tvrdého (čárkovaně) materiálu [12]

Zvýše uvedených důvodů je zřejmé, že závislost $B(H)$ nelze popsat jednou matematickou funkcí. Místo toho se využívají tabulky nebo grafy, tzv. B-H křivky. Elektromagnety nalézají uplatnění tam, kde je potřeba v průběhu času regulovat sílu magnetického pole. Aby byla regulace dostatečně silná, přesná a nedocházelo ke ztrátám magnetickou hysterezi, požadujeme od materiálů jader dostatečnou magnetickou permeabilitu, nízký zbytkový magnetismus, malou koercitivní sílu a nízké ztráty vířivými proudy.

2.3 Metody elektromagnetického odmagnetování

2.3

Z průběhu funkce $B(H)$ a obr. 5 vyplývá, že k odmagnetování může docházet působením klesající intenzity magnetického pole s proměnlivým směrem.



Obr. 5 Schéma průběhu elektromagnetického odmagnetování v B-H grafu [13]

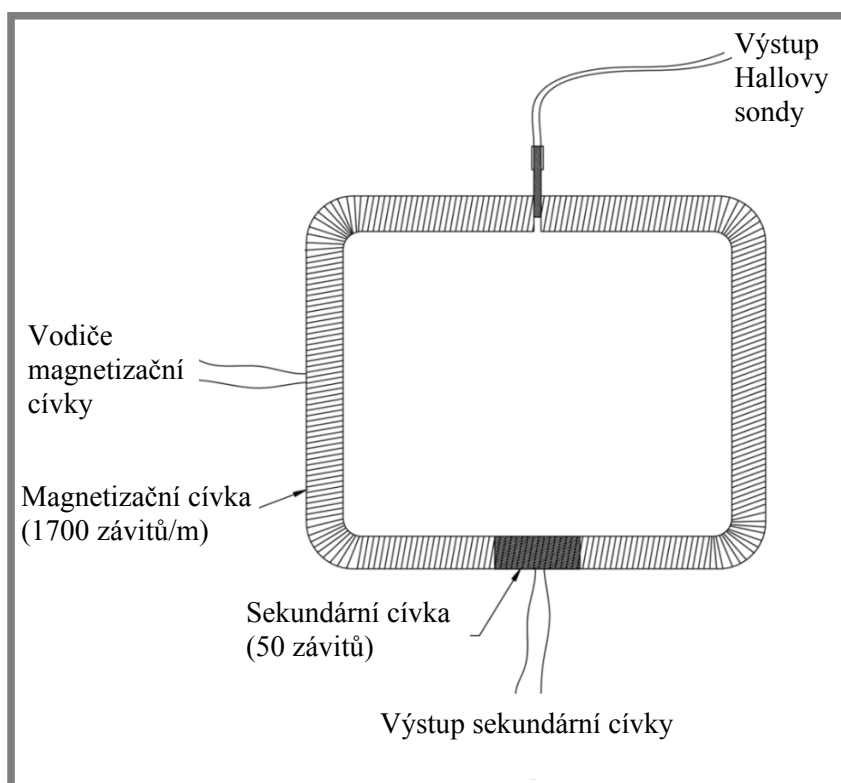
Kvalita odmagnetování se vyhodnocuje podle toho, jaká magnetická indukce je naměřena po jeho provedení. Můžeme také definovat účinnost odmagnetování jako podíl zbytkové a původní indukce.

2.3.1 Metody určení zbytkového magnetismu

2.3.1

Při moderních magnetických měřeních se nejčastěji využívá dvou fyzikálních principů, které umožňují různé způsoby měření magnetické indukce.

Hallův jev můžeme pozorovat na tenkém kovovém pásku. Proud, který jím protéká, se skládá z elektronů, jejichž dráha může být magnetickým polem zakřivena, čímž vzniká napětí mezi různými místy vodiče, které by jinak měly stejný potenciál. Toto Hallovo napětí je pak úměrné magnetické indukci a můžeme ho tudíž využít k měření její aktuální hodnoty Hallovou sondou – např. v tenké vzduchové mezeře v magnetickém obvodu. Pro účely této práce bude tato metoda nazývána „sonda“. Dále se tohoto jevu využívá také při měření proudu vodičem tzv. proudovými kleštěmi. Hlavní výhodou je rychlé měření aktuálních hodnot, nevýhodou může být to, že je měřeno na jednom poměrně malém místě v prostoru, které navíc může být problematicky dostupné.



Obr. 6 Ukázka principů měření zbytkového magnetismu [13]

Druhým způsobem je využití indukčního zákona. Magnetizační cívkou je aplikován prudký skok v proudu dostatečný k saturaci magnetického obvodu nezávisle na jeho aktuálním stavu. Na sekundární cívce se přitom indukuje napětí úměrné původní hodnotě magnetické indukce. Tato metoda zde bude nazývána „skok“. Výhodou je nízká cena sekundární cívky a snadná realizovatelnost měření. Nevýhodou je nemožnost měřit aktuální hodnoty, nutnost dodatečného výpočtu a znalosti saturační magnetické indukce daného obvodu. Schéma měření oběma způsoby je na obr. 6. Přestože jsou principy těchto metod rozdílné, ukazuje se, že při správném provedení mohou poskytovat prakticky totožné výsledky [13].

2.3.2 Parametry cívek

Vlastní indukčnost L [H] je fyzikální veličina popisující schopnost daného vodiče vytvářet magnetické pole. Je důležitým parametrem elektromagnetických cívek,

který rozhoduje, jak intenzivní magnetické pole vytvoří, pokud jsou protékány daným proudem.

Tab. 1 Aplikace EM cívek a jejich indukčnost [9,17,18,19]

Aplikace	L [mH]
HDD zapisovací hlava	$30 \cdot 10^{-6} - 60 \cdot 10^{-6}$
EM ventil spalovacího motoru	0,3 – 0,6
19“ CRT obrazovka	7,3
MR tlumič	7 -18

Indukčnost zapisovacích hlav je řádově nižší než v případě běžných MR zařízení. To odpovídá odlišným rozměrům magnetických obvodů. Dále se tato práce bude zabývat obvody, které dosahují podobných magnetických sil jako MR tlumiče.

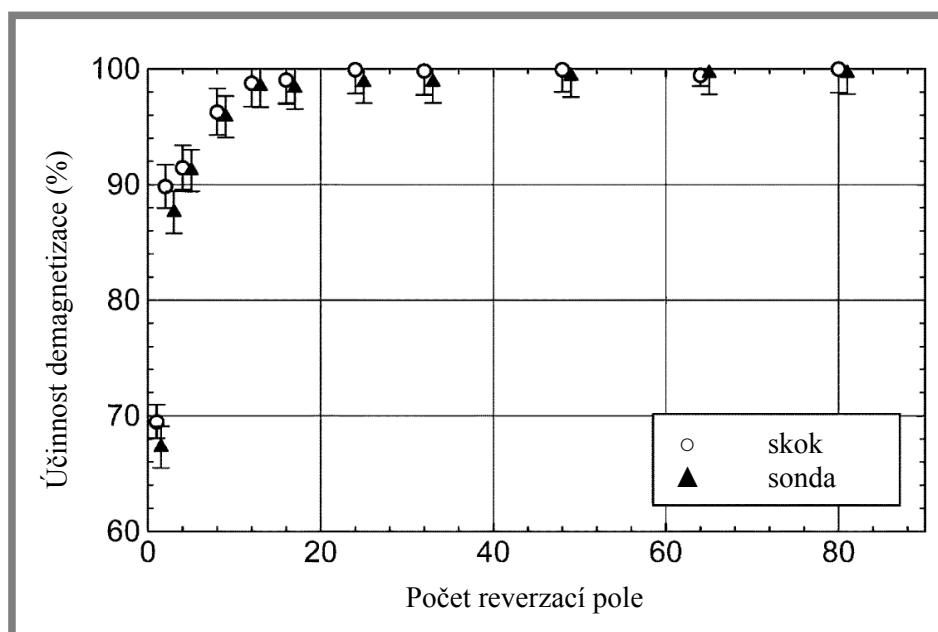
2.3.3 Parametry demagnetizačního signálu

2.3.3

Určení správného časového průběhu intenzity magnetického pole umožňuje kvalitní a rychlé odmagnetování.

Tým [14] provedl několik experimentů, ve kterých zkoumal vliv různých parametrů průběhu na výslednou remanenci – jejich výsledky zde budou prezentovány.

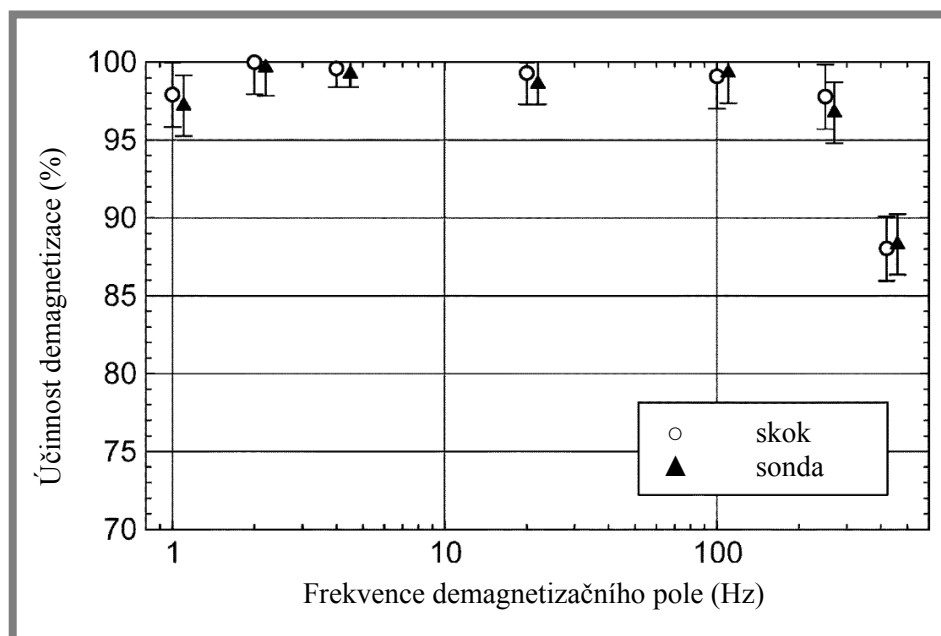
Při každé změně směru magnetické intenzity může dojít ke snížení zbytkového magnetismu. Dle grafu 1 k podstatnému snížení stačí několik cyklů, k téměř úplnému odmagnetování je jich dle ostatních podmínek potřeba až několik desítek [14]. Toto kritérium tedy můžeme nazvat počtem změn směru pole - reverzací.



Graf 1 Příklad závislosti účinnosti demagnetizace na počtu reverzací [14]

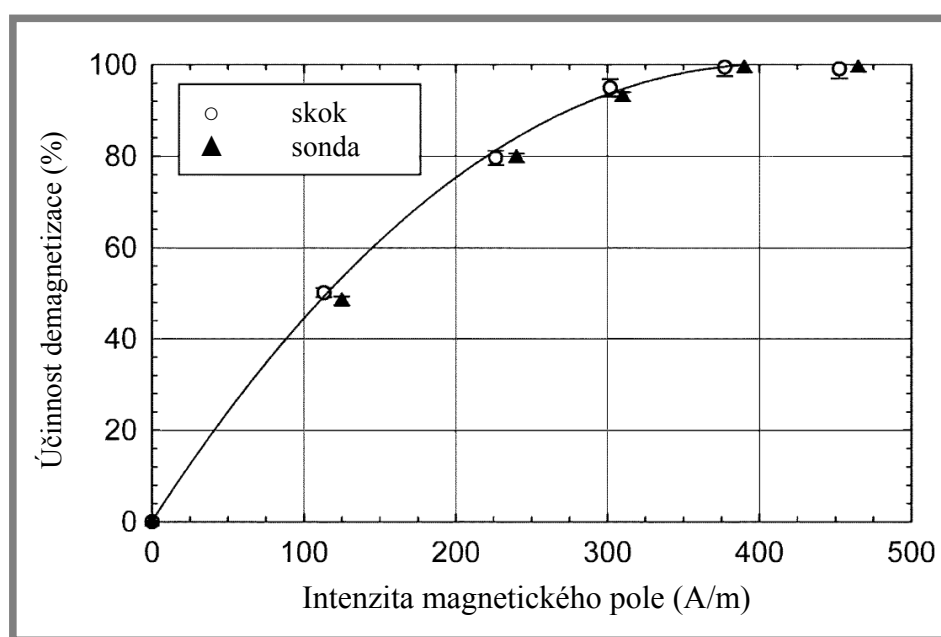
Negativní vliv na proces odmagnetování mají vířivé proudy vznikající elektromagnetickou indukci v jádře. S tloušťkou materiálu význam tohoto jevu roste, protože vzniklé proudové smyčky negují vliv vnějšího magnetického pole uvnitř látky. Z toho důvodu je vhodné se vyhnout prudkým změnám magnetické indukce,

což vylučuje využití vysokofrekvenčních střídavých proudů nebo proudů se skokovým časovým průběhem [14, 15]. Zřejmý negativní efekt mají dle grafu 2 frekvence vyšší než 100 Hz.



Graf 2 Příklad závislosti účinnosti demagnetizace na frekvenci pole [14]

K dokonalému odmagnetování je dále nutné, aby maximální amplituda magnetické intenzity byla dostatečně velká. Ukazuje se, že je potřeba alespoň taková intenzita, jakou byl vzorek zmagnetován [14]. Dle grafu 3 při nižších amplitudách účinnost procesu razantně klesá.



Graf 3 Příklad závislosti účinnosti demagnetizace na počáteční amplitudě [14]

Posledními podstatnými parametry demagnetizačního průběhu jsou tvar křivky intenzity magnetického pole a rychlost poklesu jejích amplitud. Nejčastěji se využívá harmonického průběhu (dle funkce sinus) s lineárním poklesem (hodnota harmonické funkce se násobí hodnotou klesající přímky, dokud přímka nenabude nulovou hodnotu). Tento průběh je snadné generovat a byla potvrzena jeho účinnost. Pro kvalitní a rychlé odmagnetování je výhodné, aby i magnetická indukce klesala lineárně. Pokud k tomu nedochází, je výhodnější využít takového exponenciálního poklesu intenzity pole, aby magnetická indukce rovnoměrně klesala [16].

2.3.4 Realizace proudu

2.3.4

Využití elektronického řízení proudu umožňuje generaci téměř libovolného demagnetizačního pole, a tedy může urychlit odmagnetování a zvýšit elektrickou účinnost. Navíc elektronická zařízení může být snadné nastavovat, což při experimentech nabízí větší možnosti a šetří čas.

Pokud ale postačuje generování stále stejného průběhu, nemusí být nutné používat elektronické prvky. To je možné např. při odmagnetování magnetického stínění ve starších typech barevných obrazovek (tzv. CRT).

Pro kvalitní odmagnetování v případě rozměrné obrazovky je ale potřeba velké množství energie. Postačujícím řešením je odebrání proudu při startu zařízení přímo ze sítě skrz termistor, který odebíranou energii postupně redukuje [9].

V jiných případech ale nemusí být k dispozici tak kvalitní zdroj proudu jakým je rozvodná síť, a tak může být výhodné využít oscilačního RLC obvodu, protože pro nabíjení kondenzátoru není potřebný velký průtok elektrického proudu.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

V rámci studia dostupné literatury nebyly nalezeny žádné konkrétní informace o nejvhodnějších metodách odmagnetování MR zařízení, proto bude hlavním cílem je určit a experimentálně ověřit.

Z analýzy stavu poznání vyplývá, že na kvalitu odmagnetování by mělo mít rozhodující vliv několik parametrů demagnetizačního pole:

- frekvence
- maximální amplituda
- počet reverzací
- tvar křivky průběhu

Aby mohl být určen ideální průběh, bude vyhodnocen vliv výše uvedených parametrů (i jiných, pokud budou zjištěny). Budou testovány signály:

- v co největším rozsahu frekvencí, při kterých bude docházet ke kvalitní demagnetizaci
- přednostně s maximální amplitudou alespoň tak velkou, jakou byl vzorek zmagnetován, ale pro porovnání i s menší – v praxi jsou výhodami menší amplitudy možnost použití levnějších obvodů pro generaci signálu a nižší spotřeba energie
- s dobou trvání od co nejkratší po 10 sekund
- harmonického a trojúhelníkového tvaru křivek, oba buď s lineárním, nebo s exponenciálním poklesem

Bude tedy nutné sestavit experimentální řetězec umožňující zmagnetování vzorku, generaci požadovaných demagnetizačních průběhů a měření a záznam všech podstatných veličin, aby byla možná detailní analýza.

Dá se očekávat, že:

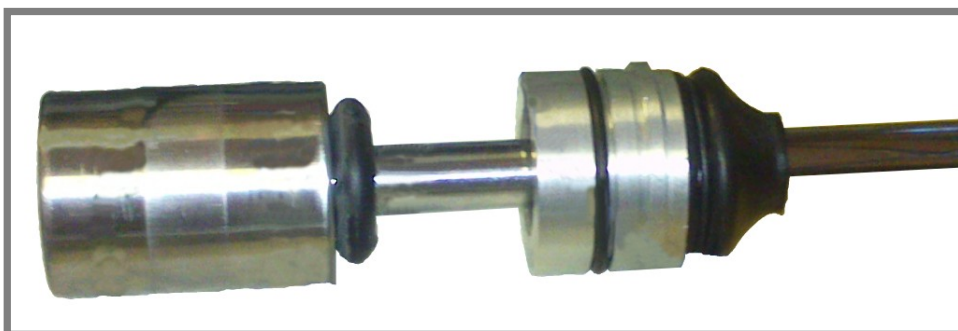
- nejlepších výsledků bude dosaženo s trojúhelníkovým průběhem, protože u něj nedochází ke zpomalení rychlosti změny intenzity pole v okolí amplitud
- pokud při lineárním poklesu pole bude rovnoměrně klesat magnetická indukce, nejspíše nebude exponenciální pokles výhodnější
- nejvýhodnější frekvence bude ta nejvyšší, při které se ještě znatelně neprojeví vliv vířivých proudů, protože bude dosaženo nejvíce reverzací za nejkratší čas
- amplituda bude muset mít alespoň takovou hodnotu, jako ustálené pole při zmagnetování vzorku, jinak nedojde k dokonalému odmagnetování

Kvalita průběhů bude hodnocena podle následujících parametrů, přičemž jsou seřazeny sestupně podle důležitosti:

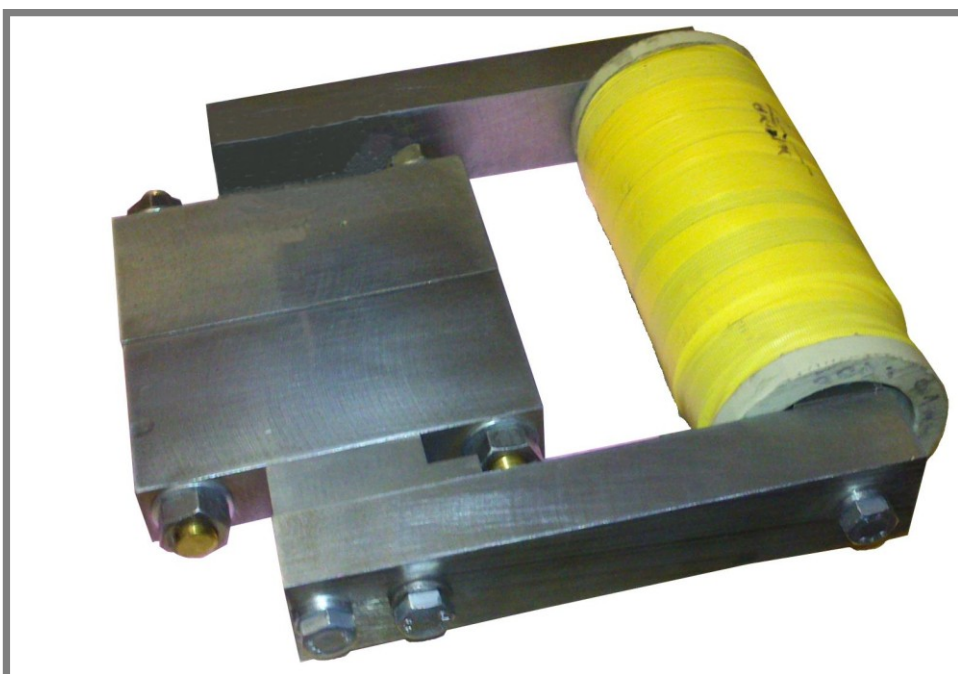
1. zbytkový magnetismus
2. doba průběhu
3. velikost maximální amplitudy

Budou zkoumány dva experimentální magnetické obvody, které jsou součástí výzkumu MR zařízení. Jedná se přednostně o ocelový píst MR tlumiče firmy Delphi (dále jen píst), ale pro porovnání a ověření výsledků bude hledán ideální způsob demagnetizace i pro magnetický obvod MR viskozimetru (reometru), který se od

pístu významně odlišuje svou konstrukcí. Fotky zkoumaných zařízení jsou na obr. 7 a 8.



Obr. 7 Píst MR tlumiče Delphi



Obr. 8 Magnetický obvod MR viskozimetru

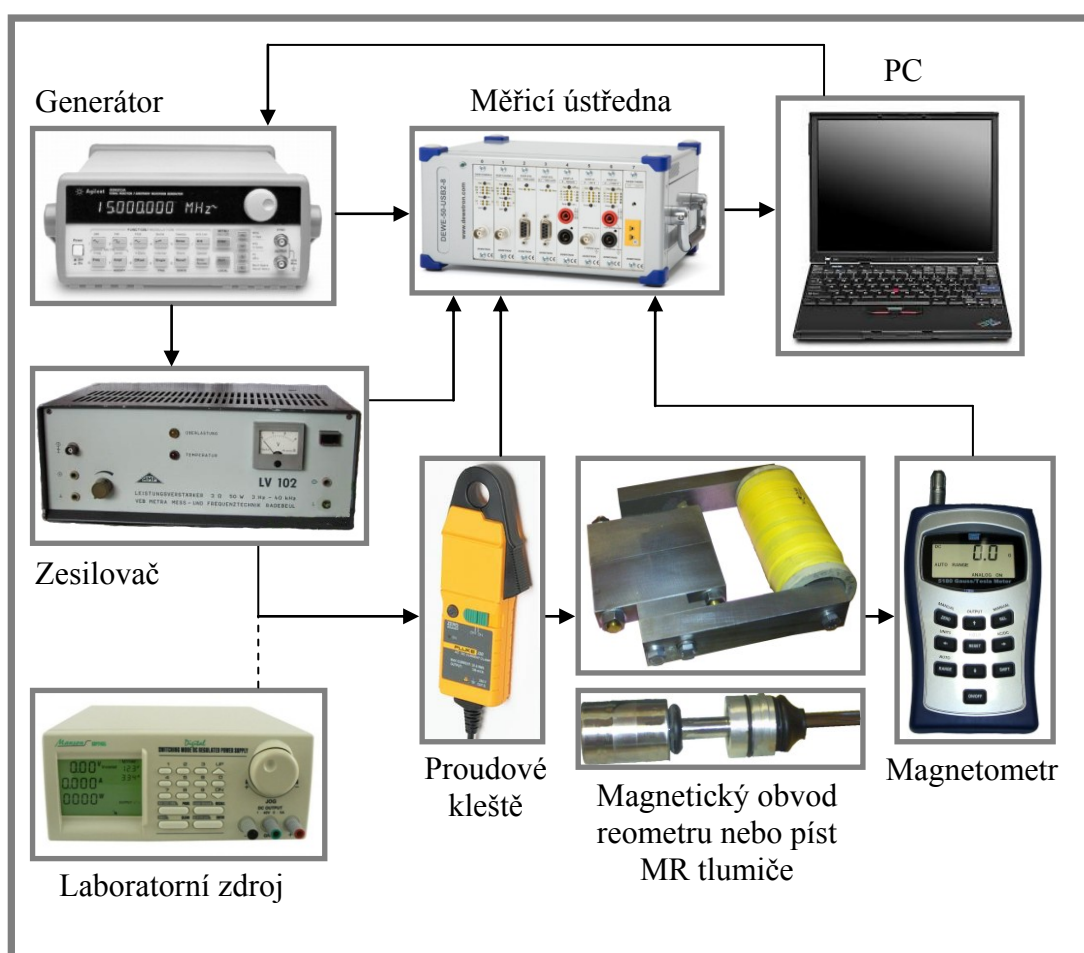
4 MATERIÁL A METODY

Návrh měřicího řetězce vycházel z požadavků na přesnost měření a nutnost záznamu většího množství dat. Dále bylo požadováno snadné nastavení libovolného demagnetizačního průběhu, aby mohl být prověřen vliv všech definovaných parametrů. Muselo být také zajištěno zmagnetování vždy stejným konstantním proudem, aby nebyly tímto procesem ovlivněny výsledky experimentů.

Pro vyhodnocení bylo nutné zaznamenávat magnetickou indukci. Dále byl měřen proud procházející cívkou, který je úměrný intenzitě magnetického pole působícího na jádro. Pro kontrolu správného nastavení bylo měřeno napětí vytvářené generátorem a napětí na cívce, které je shodné s napětím na výstupu zesilovače.

4.1 Realizace měřicího řetězce

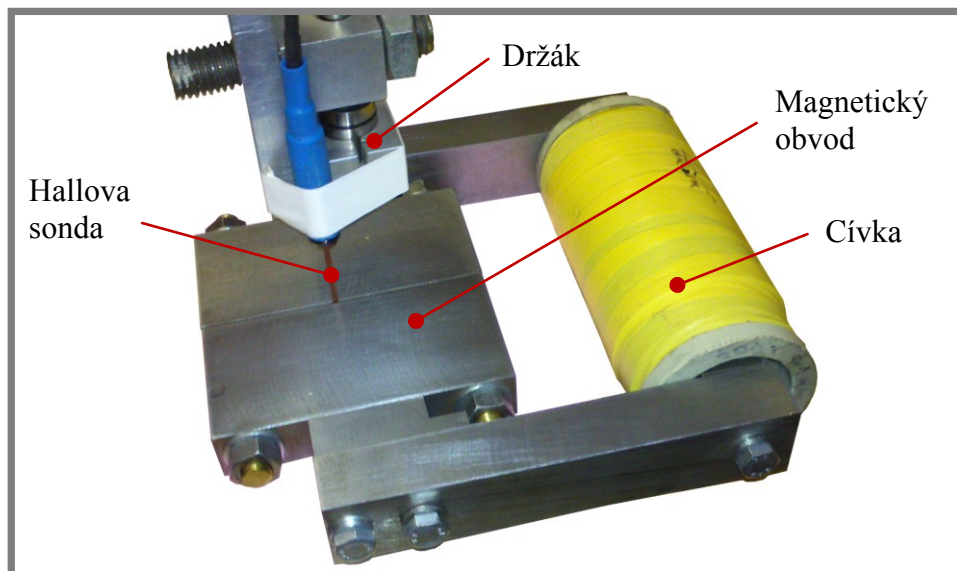
Na obr. 9 je schéma sestaveného řetězce. Pro měření magnetické indukce byla zvolena dříve popsaná metoda „sonda“¹, protože výsledky měření by se neměly téměř odlišovat od metody „skok“ a navíc byl magnetometr zapojen do měřicí ústředny, která umožňuje odečítat 10000 hodnot za sekundu a tedy celý průběh veličin v čase. Tato ústředna byla připojena z analogového výstupu do PC.



Obr. 9 Schéma měřicího řetězce

¹ viz kapitola 2.3.1

Hallova sonda byla do magnetických obvodů vsunuta tak, aby měřila v místě největšího magnetického toku – v pístu i v magnetickém obvodu reometru ve štěrbině pro průtok MR kapaliny, jak je zachyceno na obr. 10.



Obr. 10 Umístění sondy v magnetickém obvodu reometru

Proud byl měřen proudovými kleštěmi na vodiči vedoucím k cívce, protože v krátké jednoduché smyčce obvodu je v každém okamžiku všude stejný. Kleště byly také připojeny do měřicí ústředny.

Zmagnetování bylo prováděno laboratorním zdrojem konstantního proudu. Poté byl zkoumaný obvod vždy přepojen na generátor ovládaný prostřednictvím PC (připojeným přes sériový COM port), který vytvářel požadovaný průběh napětí, avšak nedokázal by cívku napájet dostatečným proudem – proto musel být do řetězce zařazen i zesilovač. Napětí na výstupu z generátoru a vstupu do elektromagnetu tudíž byla odlišná a obě byla zaznamenávána měřicí ústřednou.

Tab. 2 Seznam použitých přístrojů

Přístroj	Značka	Typ
Generátor	HP/Agilent	33120a
Laboratorní zdroj	Manson	SDP2603
Magnetometr	F. W. Bell	5180
Měřicí ústředna	DEWETRON	DEWE-50
Proudové kleště	Fluke	i30
Zesilovač	MMF	LV102

4.1.1 Software

Zvolený generátor je možné ovládat na předním panelu, ale nastavit požadované parametry je náročné a zdlouhavé. Bylo tedy zvoleno dálkové ovládání z PC pomocí příkazů v programu MATLAB². Pro tento účel byly připraveny skripty pro snadné nastavení i spuštění signálu (jsou k dispozici v příloze II). Požadovaných průběhů

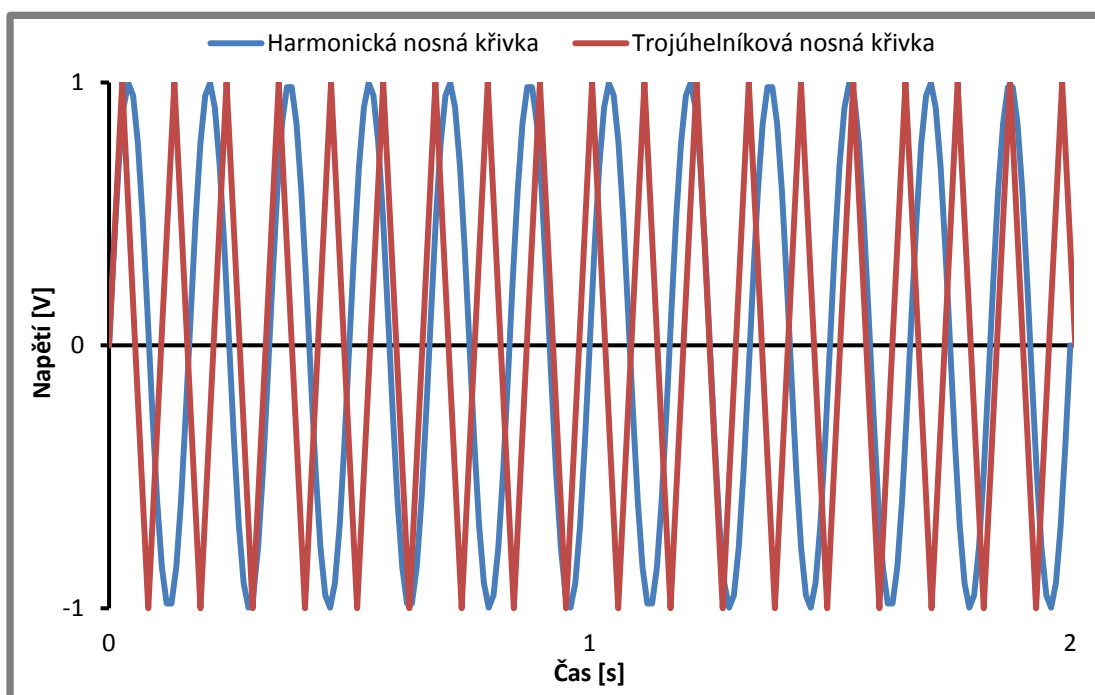
² program společnosti MathWorks® obsahující interaktivní programovací prostředí

bylo dosahováno metodou amplitudové modulace, takže byla nastavována frekvence a tvar modulující a nosné křivky. Dále byla nastavována počáteční amplituda generovaného napěťového signálu, amplituda proudu pak musela být manuálně seřízena na zesilovači.

Měřené veličiny byly zaznamenávány a zobrazovány programem Dewesoft[®], který umožňuje shromažďovat velké množství hodnot veličin a pohodlně je analyzovat. Je také možné získaná data exportovat do programu MS Excel, ve kterém byly vykresleny všechny následující grafy.

4.2 Zkoumané průběhy

V režimu amplitudové modulace má generátor předdefinovaný harmonický i trojúhelníkový průběh nosných křivek, tedy těch, kterými se řídí tvar průběhu napětí. V grafu 4 jsou tyto průběhy porovnány pro přehlednost s konstantní amplitudou, přičemž frekvence harmonická funkce je 6 Hz. Trojúhelníková křivka při stejné maximální rychlosti změny napětí v čase dosahuje 9 Hz a za stejnou dobu projde podstatně více reverzacemi, přestože by měla mít prakticky stejný vliv na indukci nežádoucích vířivých proudů.



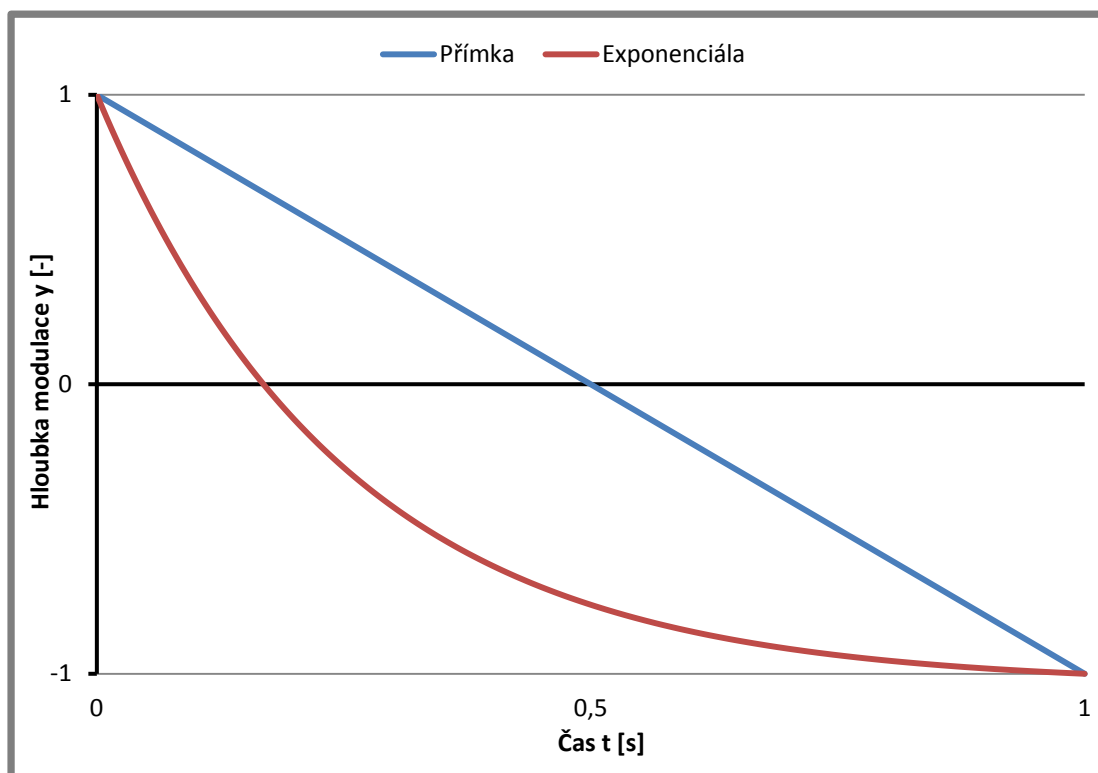
Graf 4 Porovnání harmonické funkce při 6 Hz s trojúhelníkovou nosnou křivkou

Pro dosažení poklesu byly do generátoru nahrány 2 modulující funkce. Nastavení modulace v generátoru probíhá tak, že nahraná funkce je definována v časovém intervalu $t \in (0; 1s)$ a jiných dob poklesu je dosahováno změnou frekvence této funkce. Její hodnoty jsou v rozsahu $y = (-1; 1)$, přičemž při $y = -1$ je výsledná hodnota jakékoliv nosné funkce nulová, se vzrůstající hodnotou y roste, až při $y = 1$ dosahuje maximální nastavené.

Použitá modulující přímka, respektive exponenciála jsou zobrazeny v grafu 5 a odpovídají rovnicím:

$$y = -2x + 1$$

$$y = \frac{2 \cdot e^{-4 \cdot t}}{-e^{-4} + 1} - \frac{2}{1 - e^{-4}} + 1$$



Graf 5 Porovnání použitých modulačních funkcí

Nejnižší frekvence nosné funkce je omezena zesilovačem, který garantuje kvalitní zesílení až od 3 Hz. Bude zjištěno, zda bude možné generovat i frekvenci 2 Hz. Nejvyšší zkoumaná frekvence bude taková, při které bude zjištěno zásadní zhoršení výsledků (vlivem vířivých proudů).

Základní maximální amplituda bude nastavována tak, aby bylo zajištěno dosažení alespoň takové hodnoty proudu, jakou byl vzorek magnetován.

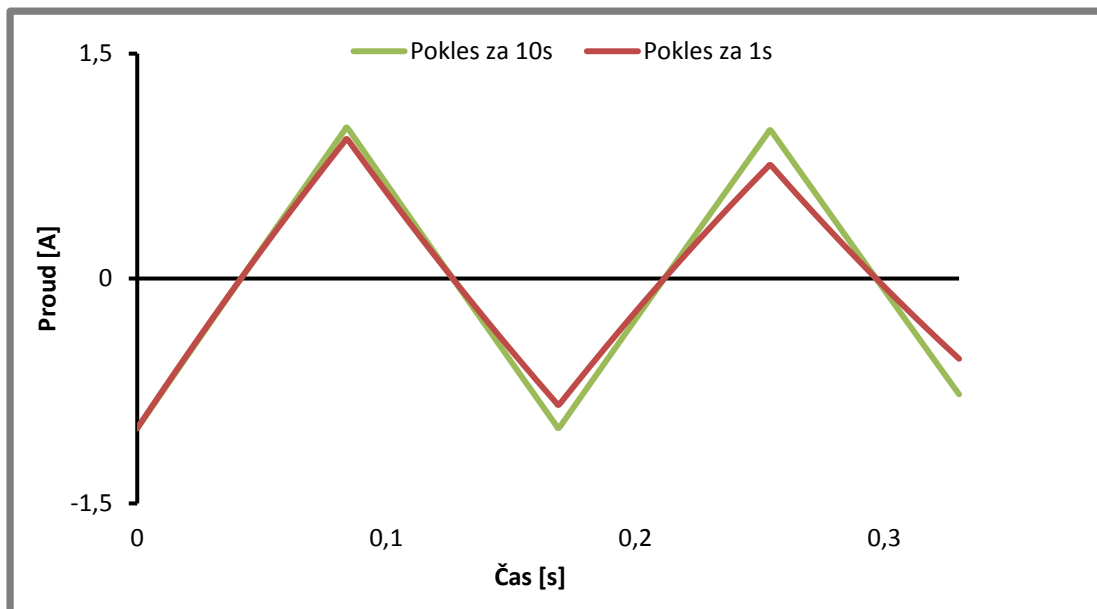
Doby demagnetizace budou voleny tak, aby postihly rozsah od co nejkratšího času po 10 sekund.

4.3 Analýza naměřených dat

Měřením závislosti B-H bude určena magnetická indukce, při které dojde k saturaci. Na tuto hodnotu bude vzorek zmagnetován ustáleným zdrojem a po odpojení bude určena magnetická remanence.

Následně bude spuštěn demagnetizační signál. Bude kontrolován zejm. průběh demagnetizačního proudu, jeho amplituda a kvalita tvaru, aby bylo zajištěno, že je na vzorek skutečně působeno magnetickým polem s požadovanými parametry. Za účelem kontroly trojúhelníkového průběhu byl vykreslen graf 6, který bude srovnán s naměřenými daty.

I přes modulaci hodnot nedochází ke znatelné deformaci jednotlivých úseků, které zůstávají při poklesu za 10 sekund prakticky přímé, při poklesu za 1 sekundu je viditelná malá odchylka.



Graf 6 Trojúhelníkový průběh při 6 Hz a lineárním poklesu

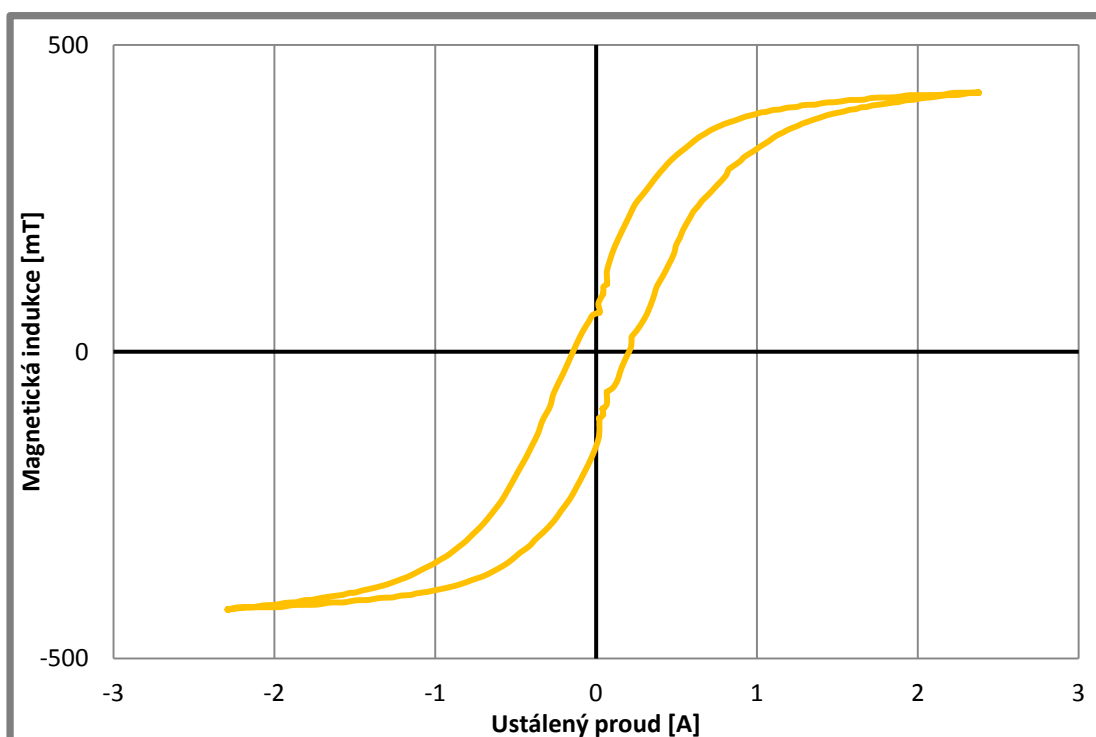
Výstupním parametrem bude remanence po odmagnetování určená jako aritmetický průměr hodnot magnetické indukce naměřených v dostatečné době po proběhnutí signálu. Namátkově budou některé průběhy měřeny vícrát, a pokud dojde k podstatně odlišným výsledkům, bude to zanalyzováno. Průběhy s nejlepšími či nečekanými výsledky budou také ověřeny alespoň dvojím měřením.

Bude zjišťována závislost kvality odmagnetování na jednotlivých nastavovaných parametrech a bude také zkoumáno, zda nemají vliv nějaké jiné parametry, které nejsou přímo nastavovány.

5 VÝSLEDKY

Vzhledem k časové náročnosti měření byly experimenty prováděny především s cílem splnění zadání této práce, tedy nalezení rychlé metody odmagnetování. Nedá se s jistotou říci, že byly nalezeny nejrychlejší možné průběhy, ale dle zjištěných výsledků se dá předpokládat, že nejlepší objevené postupy by nemělo být možné o mnoho překonat. Aby bylo možné toto tvrdit, byly také zjišťovány důvody, proč při daných nastaveních dojde k daným výsledkům.

Před spuštěním demagnetizačního průběhu byl vzorek vždy zmagnetován k saturaci, přičemž u pístu bylo z parametrů známo, že stačí 2 A stejnosměrného proudu. Pro obvod reometru byla změřena závislost $B(I)$, která v podstatě odpovídá závislosti $B(H)$.



Graf 7 $B(I)$ charakteristika obvodu reometru

Z v grafu 7 lze určit, že k saturaci postupně dochází už zhruba od 0,5 A, ale v případě, že byl obvod záporně zmagnetován (pravá polovina křivky), dojde k téměř úplné saturaci až přibližně při 2 A. Aby tedy byl spolehlivě odstraněn vliv předchozích stavů, byl magnetizační proud zvolen stejně jako u pístu, tedy 2 A.

Byla zjištěna průměrná přibližná ustálená hodnota magnetické indukce během procesu a průměrná přibližná remanence po odpojení od zdroje stejnosměrného proudu.

Tab. 3 Parametry zmagnetování

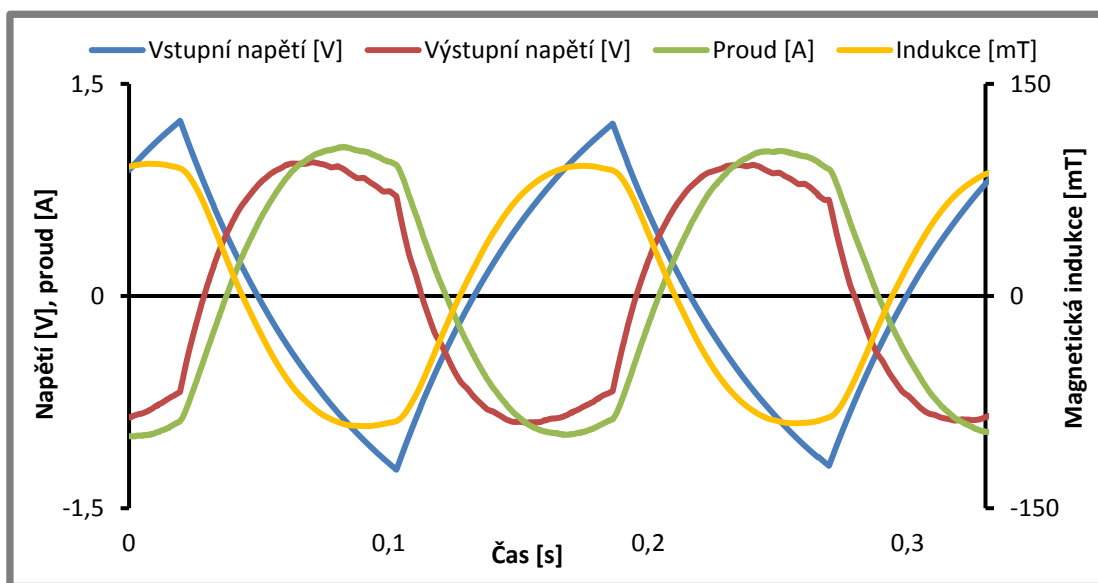
Vzorek	Indukce při zmagnetování	Remanence
Píst	290 mT	13 mT
Obvod reometru	350 mT	74 mT

Z tab. 3 je zřejmé, že navzdory menším rozměrům dokáže píst generovat podobnou magnetickou indukci jako obvod reometru. Přesto vykazuje téměř 6x menší remanenci – jeho vlastnosti jako elektromagnetu jsou tedy lepší a dá se předpokládat, že by mělo být snazší jej odmagnetovat.

5.1

5.1 Volba tvaru průběhu

Zkoumanými tvary nosné funkce byl harmonický a trojúhelníkový průběh. Oproti očekávání docházelo k obrovské deformaci trojúhelníkového tvaru vůči požadovanému tvaru (viz graf 6) – příklad zaznamenaného průběhu je v grafu 8. Poškození tvaru průběhu způsoboval použitý zesilovač, který není uzpůsoben k tomu, aby generoval takovéto napětí na elektromagnetu.



Graf 8 Příklad trojúhelníkového průběhu na pístu při 6 Hz a poklesu za 10 s

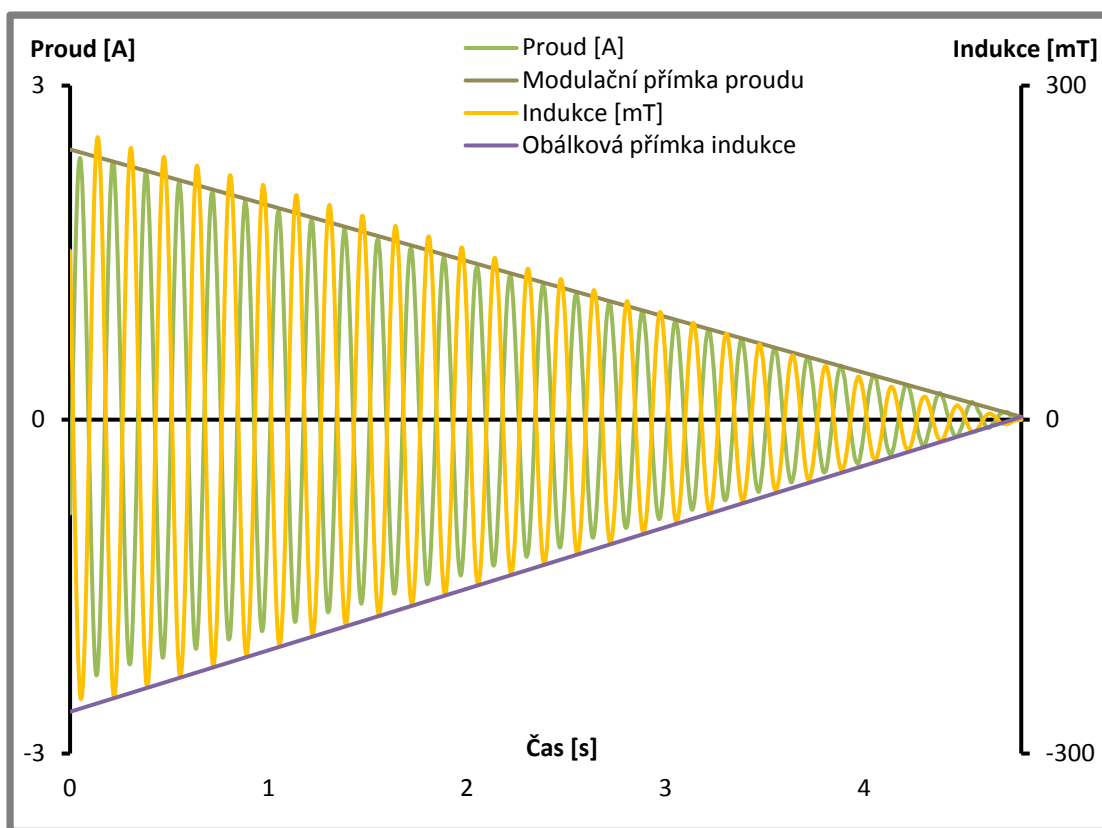
Výsledný proud procházející obvodem naprosto nesplňuje stálou rychlost změny své hodnoty v čase, kvůli které byl trojúhelníkový průběh navržen. Nedá se tedy předpokládat, že bude výhodnější.

Modulující funkce byly zkoušeny dvě – přímková a exponenciální. Bylo zjištěno, že i při přímkové amplitudové modulaci proudu dochází v případě pístu k dostatečně lineárnímu poklesu magnetické indukce a to při velkých i malých frekvencích. Jiný typ amplitudové modulace by tedy neměl být nutný³.

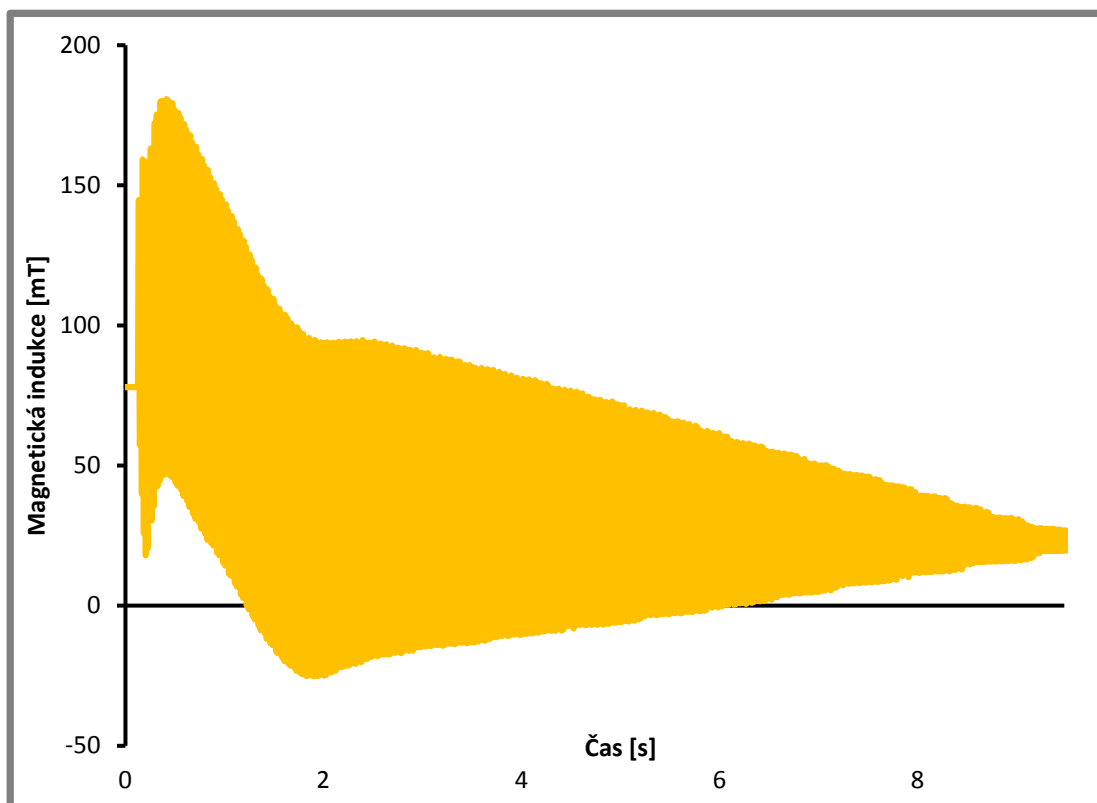
Naopak v obvodu reometru dochází k výrazné deformaci časového průběhu magnetické indukce oproti průběhu proudu. Průběh je často značně nesymetrický podle časové osy (více při větší frekvenci) a amplituda neklesá přesně podle přímky, jako je tomu v případě pístu.

Nesymetrii zobrazenou v grafu 10 lze vysvětlit vířivými proudy, které se indukují a mění velikost magnetické indukce. Magnetický obvod pístu má zřejmě konstrukci, která tento vliv zásadně snižuje. To, že v případě obvodu reometru nedochází v porovnání s pístem k podobně lineárnímu poklesu, může být způsobeno také větší magnetickou tvrdostí jeho materiálu.

³ viz poslední odstavec kapitoly 2.3.3

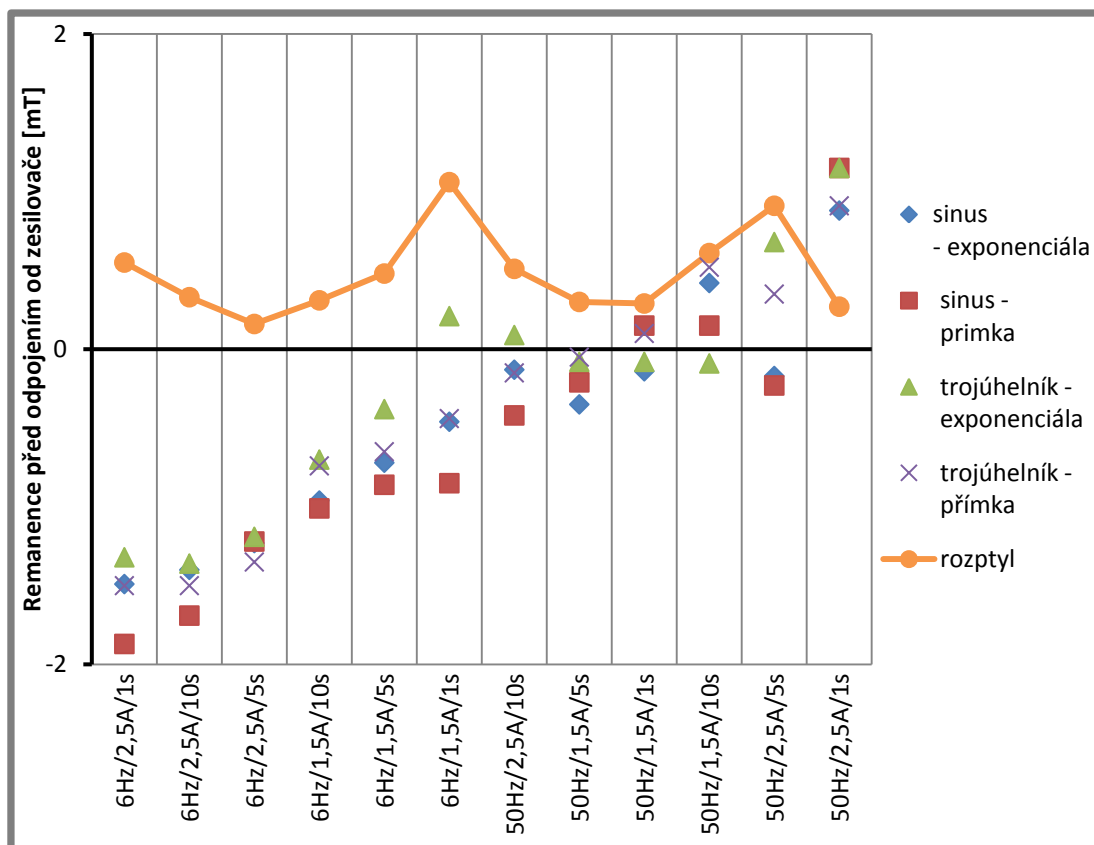


Graf 9 Harmonický průběh o 6 Hz s přímkovou modulací proudu na pístu



Graf 10 Harmonický průběh o 50 Hz s přímkovou modulací proudu na obvodu reometru

Pro finální zhodnocení byl na pístu proveden experiment, při kterém byl zjišťován zbytkový magnetismus po 4 zkoumaných tvarech průběhu při 12 různých nastaveních zbylých parametrů.



Graf 11 Porovnání remanence na pístu po jednotlivých tvarech průběhu

V grafu 11 byly výsledky seřazeny od nejnižší po nejvyšší průměrnou remanenci. Diskrétní hodnoty maximálního rozptylu byly pro přehlednost spojeny čarou.

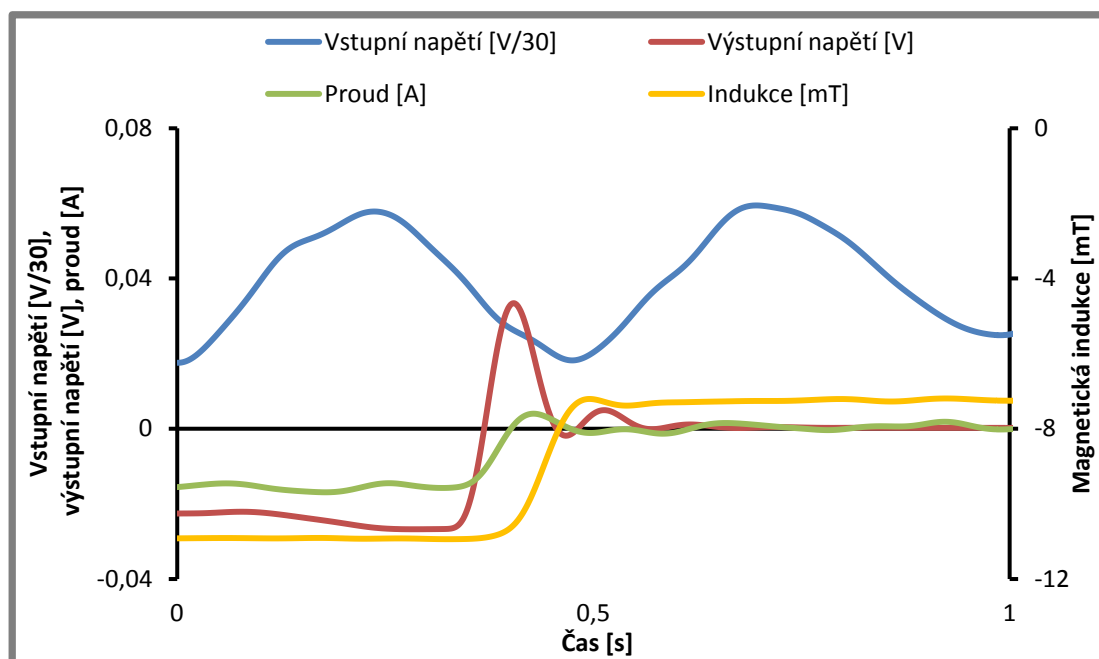
Ve většině případů je rozptyl mezi jednotlivými typy průběhu vzhledem k ostatním nahodilým vlivům zanedbatelný. Ojediněle dosahuje téměř 1 mT, ale celkově nelze říci, že by volba typu demagnetizační křivky měla podobně významný vliv jako ostatní parametry (ty mění remanenci i o více než 3 mT).

Vzhledem k výše uvedeným faktům v této kapitole bylo rozhodnuto, že dále budou experimenty vedeny pouze s harmonickou nosnou křivkou a modulující přímkou. Tento průběh je nejsnáze generovatelný a s použitými přístroji by měl umožnit prakticky stejně dobré výsledky jako ostatní alternativy.

Při analýze výsledků použitých v grafu 11 byl však zjištěn nečekaný problém – po odpojení obvodu elektromagnetu od zesilovače dojde k podstatné změně magnetické indukce. Protože nebyla ve většině případů zaznamenána remanence po odpojení, do grafu byly vyneseny hodnoty při zapojeném obvodu. Porovnání průběhů by to nemělo znemožnit, protože se dá očekávat, že odskoky po odpojení se nebudou pro různé průběhy významně lišit. Cílem však je, aby byl vzorek skutečně odmagnetován, takže dále bude vždy uváděna remanence po odpojení.

5.2 Zkoumání offsetu

Použitý generátor v režimu amplitudové modulace pracuje tak, že i pokud je nastavena nulová výchylka, produkuje průběh nosné křivky s velmi malou amplitudou (okolo 5 mV). Zesilovač je tím ovlivněn a vytváří malý proud (okolo 15 mA), který ovlivňuje naměřenou magnetickou indukci. To, že je proud nenulový i když je nastaven na nulu, nazveme offsetem. V okamžiku odpojení tento vliv pomine a je dokonce možné, že náhlá změna velikosti proudu ovlivní výslednou remanenci.



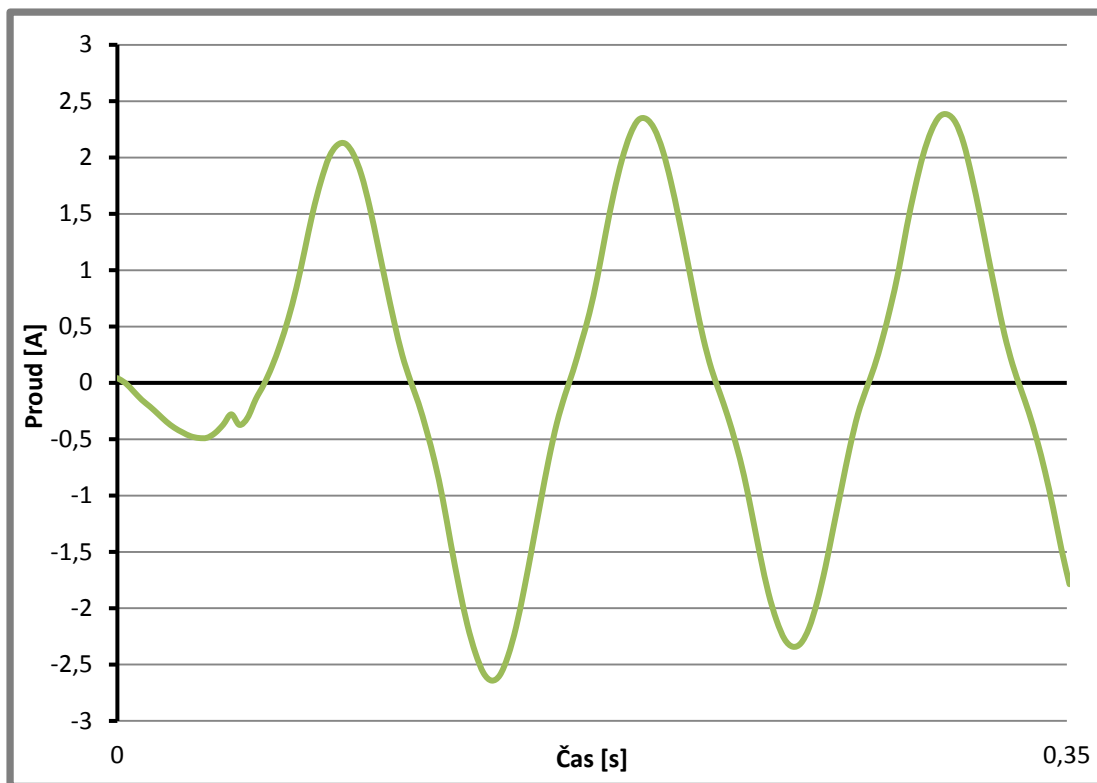
Graf 12 Průběh veličin při 2 Hz při odpojení obvodu reometru od zesilovače⁴

Při opačné polaritě zapojení k zesilovači dojde ke stejnému jevu, pouze v opačném smyslu, než je zobrazeno v grafu 12. Bylo však zjištěno, že výsledná remanence v těchto dvou případech není symetrická kolem nuly, ale je menší, pokud má skok v indukci při odpojení takový směr, že přibližuje její hodnotu původní hodnotě před průběhem demagnetizace. Tento způsob zapojení nazveme „vhodným“, druhý způsob nazveme „opačné zapojení“.

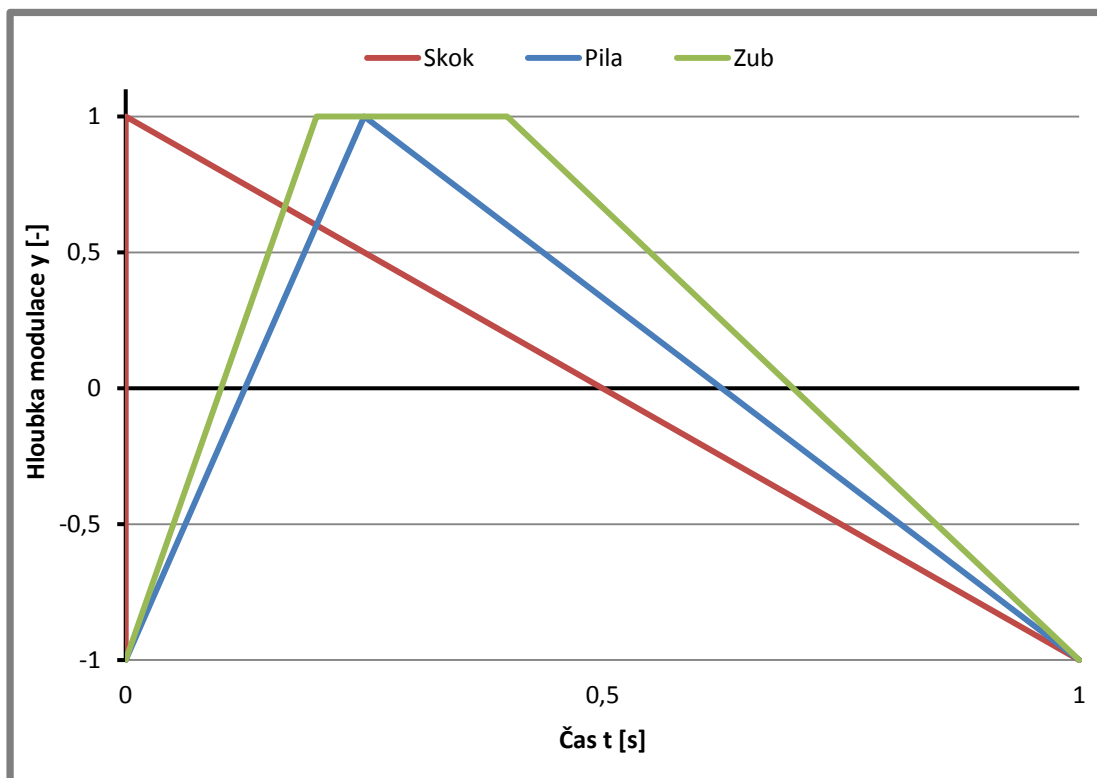
Jedním z navrhovaných vysvětlení bylo, že výše popsanou nesymetrii způsobuje nerovnoměrný náběh proudu na začátku demagnetizace (např. takový, jehož záznam je v grafu 13), při kterém po zlomek sekundy nejdříve není dosažena nastavená amplituda a poté je často v jednom směru překročena.

Byly navrženy 2 modulační průběhy, které měly zamezit případnému vlivu nekvalitního náběhu – „pilový“ a „zubový“. Běžný náběh byl nazván „skokový“. Všechny jsou znázorněny v grafu 14. Význam hloubky modulace y a smysl hodnot času křivek zobrazených v tomto grafu je stejný, jak bylo popsáno v kapitole 4.2.

⁴ šum byl z naměřených dat odstraněn IIR filtrem v programu Dewesoft®

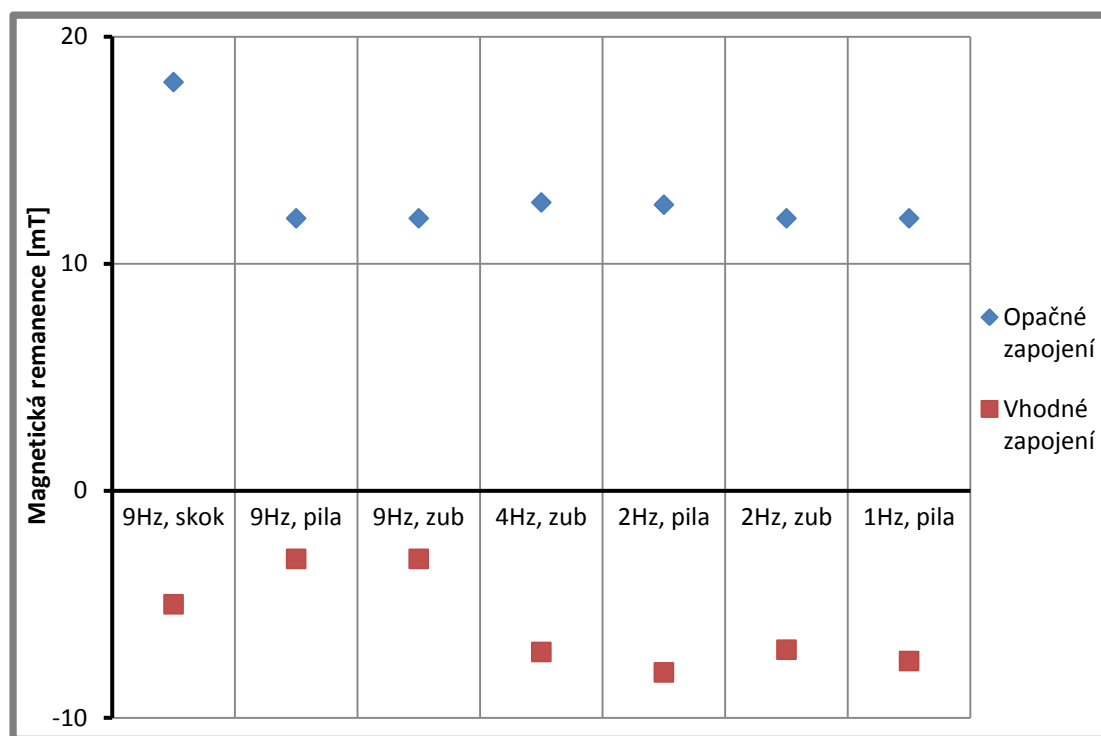


Graf 13 Nerovnoměrný náběh proudu cívkou obvodu reometru při 9 Hz, 2,5 A a 10 s



Graf 14 Porovnání navržených náběhů

Bylo provedeno několik měření, aby bylo možné rozhodnout o vlivu náběhu na nesymetrii remanence při opačných zapojeních.



Graf 15 Porovnání opačných zapojení při 10s poklesech

Z grafu 15 je zřejmé, že v případě zubové i pilové modulace dochází také ke značné nesouměrnosti výsledků, ta tedy nemůže být způsobena nekvalitním náběhem. Zajímavé také je, že při 9 Hz došlo k méně kvalitnímu odmagnetování v případě skokového náběhu. Pozvolné náběhy však prodlužují čas demagnetizačního průběhu, takže pokud to bude možné, bude preferován rychlý skokový náběh.

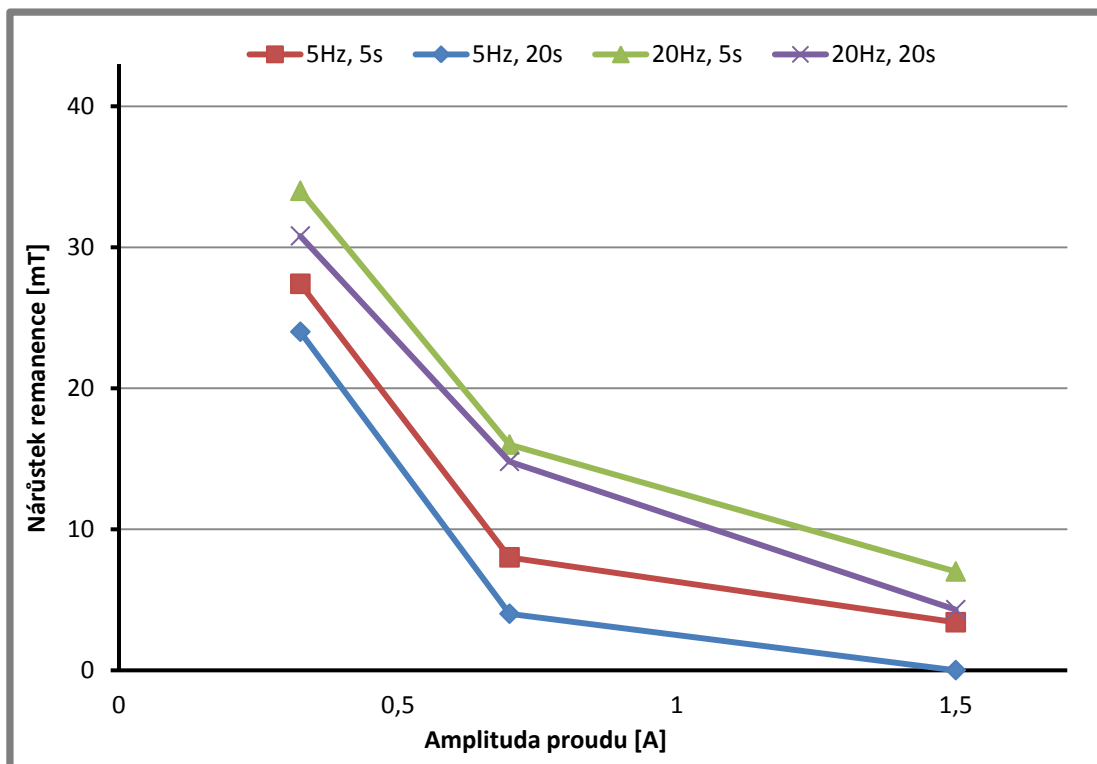
V jiném režimu generátoru – „burst modulation“⁵ – k nesymetrii nedochází, ale k offsetu v systému ano. To znamená, že při „opačném“ zapojení jsou výsledky o něco lepší než s použitím amplitudové modulace, ale při „vhodném“ zapojení jsou naopak horší. To komplikuje dosažení kvalitní demagnetizace. Navíc v „burst modulation“ generátor neumožňuje postupný pokles amplitudy předdefinované nosné funkce, takže je nutné pro každé jiné nastavení zdlouhavě nahrávat daný průběh, což navíc opotřebovává jeho paměťové zařízení.

5.3 Maximální amplituda

Předpokládalo se, že bude nutná počáteční amplituda demagnetizačního signálu alespoň o velikosti proudu při zmagnetování (2 A). Vzhledem k deformaci (náběhu) průběhu popsané v předchozí kapitole bylo nastavováno 2,5 A, aby bylo i při kratším čase dosaženo alespoň požadovaných 2 A. V kapitole 3 však byly popsány výhody nižší počáteční amplitudy, takže byla provedena měření, aby byl ověřen její vliv na výslednou remanenci – jejich výsledky jsou v grafu 16 a 17.

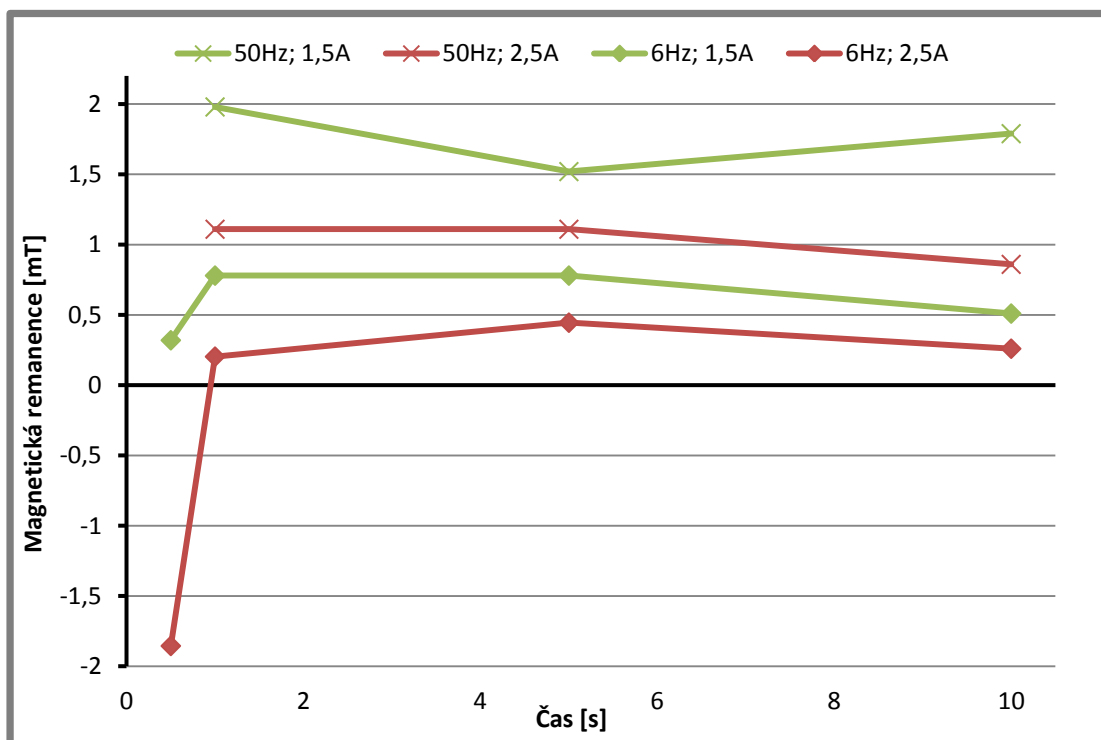
5.3

⁵ v podstatě „impulsní modulace“ – je defaultně generován pouze 1 žádaný impuls



Graf 16 Nižší maximální amplitudy na obvodu reometru v porovnání s remanencí při 2,5 A

V případě obvodu reometru bylo zjištěno zásadní zhoršení při 0,8 A a méně, při 1,5 A už mohlo dojít ke stejně kvalitnímu odmagnetování. Proto už dále budou zkoumány pouze průběhy s nastavenou amplitudou 1,5 A a 2,5 A.



Graf 17 Porovnání nižší a standardní amplitudy na pístu

S maximální amplitudou 1,5 A došlo k poměrně dobrému odmagnetování i na pístu, z grafu 17 je však zřejmé, že ve všech měřených případech k menšímu než při standardní amplitudě 2,5 A. Protože hlavním cílem této práce je dosažení dokonalého odmagnetování, v případě pístu už budou dále zkoumány jen průběhy s 2,5 A.

5.4 Hledání ideálního průběhu

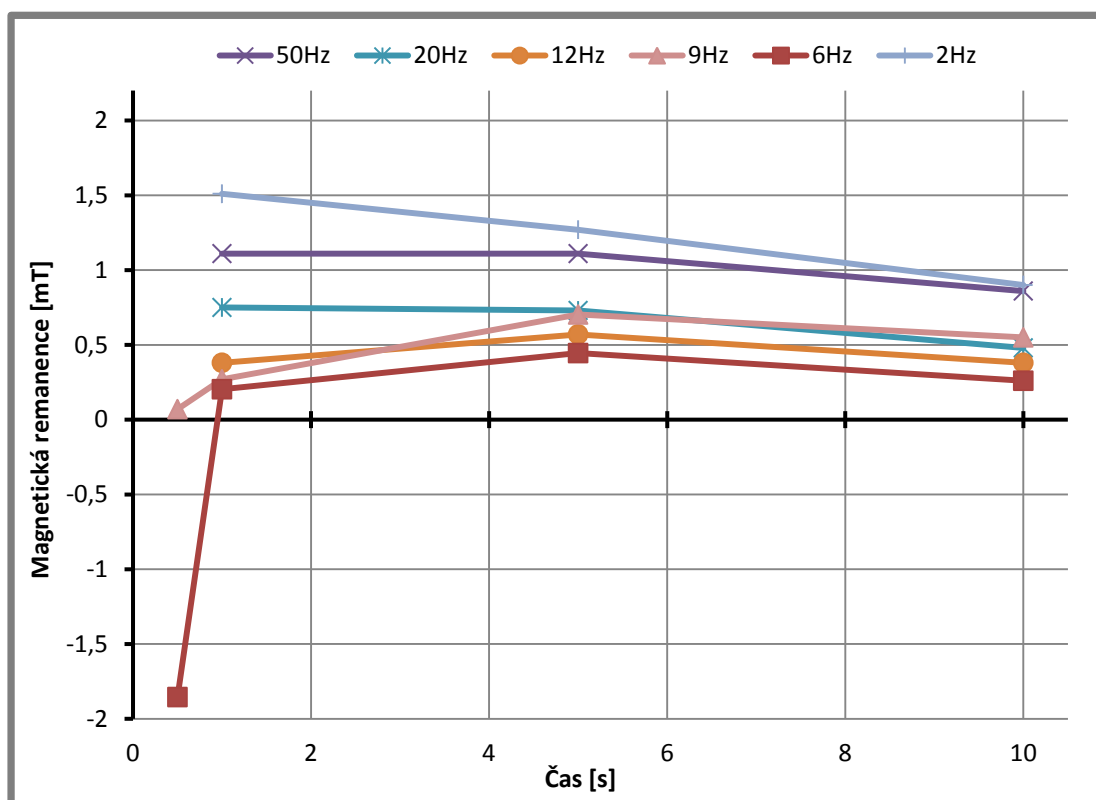
5.4

Byl zvolen harmonický průběh s přímkovou modulací a amplitudou 2,5 A (u obvodu reometru bude ještě zkoumána i 1,5 A) se skokovým náběhem. Zbývá najít ideální frekvenci, při které dojde k nejrychlejšímu dokonalému odmagnetování.

5.4.1 Zkoumání remanence pístu

5.4.1

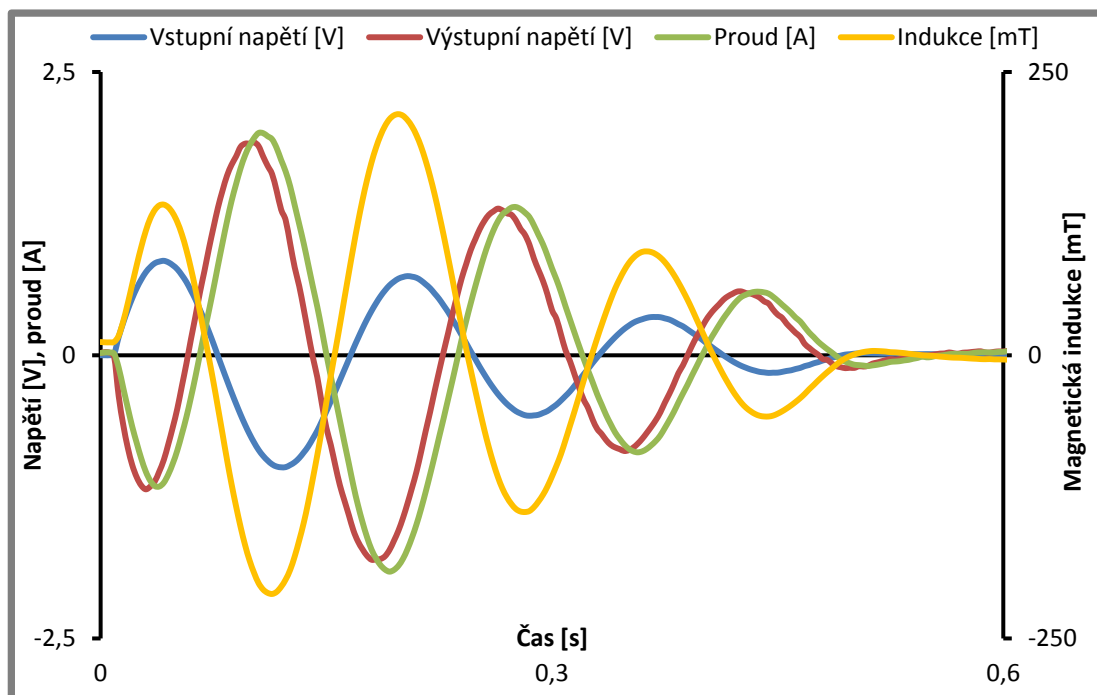
Frekvence byly voleny tak, aby při největší zkoumavé už došlo ke znatelnému nárůstu remanence vlivem vířivých proudů. Nejmenší frekvence byla omezena zesilovačem, který garantuje funkci od 3 Hz, ale při 2 Hz ještě pracoval spolehlivě. Maximální čas byl omezen na 10 sekund, delší odmagnetování by bylo zdlouhavé.



Graf 18 Remanence pístu při 2,5 A a harmonickém průběhu s přímkovou modulací

Dle grafu 18 je při 50 Hz remanence už podstatně větší než ve zbylých případech kromě 2 Hz. Špatné výsledky při 2 Hz by se daly vysvětlit malým počtem reverzací, pokud by ovšem nedocházelo při jiných frekvencích k velmi kvalitnímu odmagnetování za velmi krátký čas. Je velmi překvapivé, že při středních frekvencích dochází ke zlepšení výsledku při 1 s a při 6 Hz a 0,5 s dokonce dochází ke změně směru magnetické indukce.

Pravděpodobným důvodem je právě rychlý pokles, který má za následek to, že předposlední amplituda proudu je mnohonásobně větší než poslední.



Graf 19 Průběh při 6 Hz a 0,5 s na pístu

Pokud má předposlední amplituda magnetické indukce opačný směr než původní remanence a poslední amplituda má mnohem menší velikost, rozdíl konečné a počáteční remanence je větší než při delších průbězích. K tomu při zvolených časech průběhů 0,5 a 1 s došlo při 6, 9 a 12 Hz a příklad takového záznamu je v grafu 19. Pokud naopak předposlední amplituda má stejný směr jako původní remanence a poslední je znovu mnohem menší, je výsledná remanence bližší původní, k čemuž docházelo při zvolených časech při frekvenci 2 Hz.

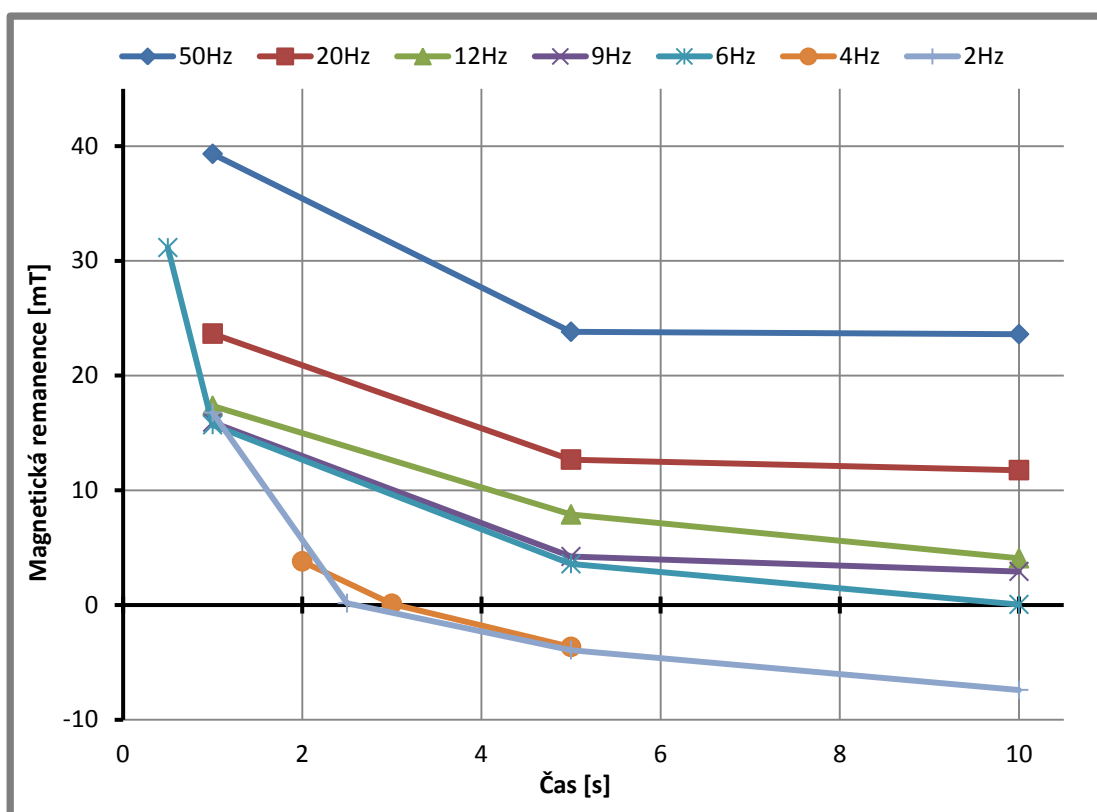
V případě, že je skutečně vliv poslední velké amplitudy proudu tak velký, bylo by vhodné přizpůsobit modulační křivku tak, aby byla zaručena vhodná velikost poslední amplitudy. To už však přesahuje rozsah této práce.

5.4.2 Zkoumání remanence obvodu reometru

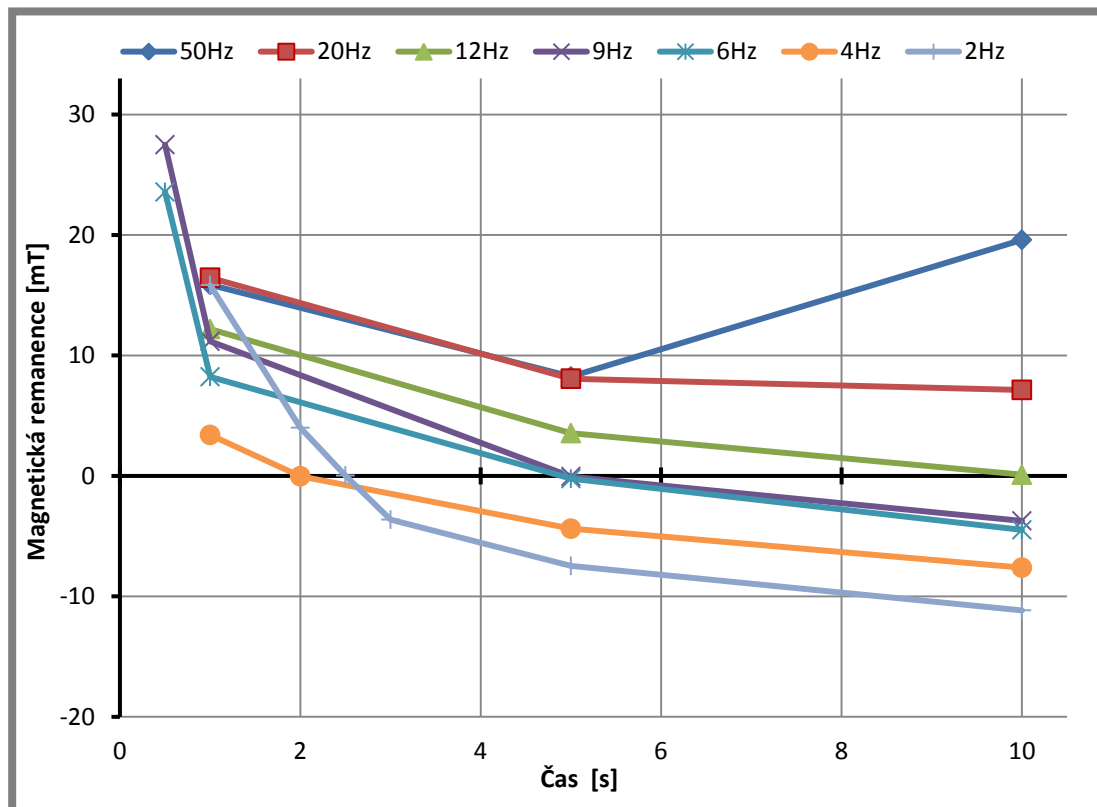
Vzhledem k zcela odlišné konstrukci obvodu reometru od pístu nejsou překvapivé jiné výsledky. Jeho parametry neumožňují tak rychlé odsmagnetování.

V grafech 20 a 21 jsou naměřené výsledky. Delší doba průběhu při ostatních stejných parametrech až na jednu výjimku vždy snížila výslednou remanenci. Tou je 50 Hz a 2,5 A, v grafu 10 je zobrazen značně deformovaný průběh jeho indukce, který má zřejmě negativní vliv na výslednou remanenci. V tomto případě se tedy potvrzuje teoretický předpoklad, že větší počet cyklů zlepšuje odsmagnetování.

Při delších časech a nižších frekvencích magnetická indukce získává opačný směr oproti původnímu zsmagnetování. Možným vysvětlením je, že když je průběh kvalitní, na jeho konci je vzorek prakticky bez jakéhokoliv zsmagnetování. Offset systému (popsaný v kapitole 5.2) ale nakonec vzorek znovu zsmagnetuje, při „vhodném“ zapojení ve směru opačném vůči původní remanenci. Z naměřené $B(I)$ charakteristiky bylo zjištěno, že v části s velmi nízkými proudy se magnetická indukce mění přibližně o 0,7 mT/mA. To při offsetu 15 mA odpovídá 10,5 mT.



Graf 20 Remanence obvodu reometru při 1,5 A a harmonickém průběhu s přímkovou modulací



Graf 21 Remanence obvodu reometru při 2,5 A a harmonickém průběhu s přímkovou modulací

Při 1,5A je hodnota remanence pro stejnou frekvenci a čas vždy vyšší než při 2,5A. Vzhledem k poklesu do záporných hodnot však i při nižším proudu a nižších frekvencích dojde ke kvalitnímu odmagnetování, ale o něco pomaleji.

Nejlepší výsledek při nejkratším čase byl zjištěn pro průběh 4 Hz při 2,5 A a 2 s. Navíc oproti 2 Hz se remanence příliš nemění při 1 a 5 s, takže se dá předpokládat, že toto nastavení zaručí stabilní dobré výsledky.

6 DISKUZE

Ve výsledcích provedených experimentů se vyskytly velké odlišnosti oproti předpokladům popsaným v druhé kapitole (přehled současného poznání). Jedná se zejména o vliv polaritu zapojení, kdy při jednom způsobu zapojení může dojít ke kvalitnímu odmagnetování a při opačném nikoliv. Dále nečekaně v některých případech měla výsledná magnetická indukce opačný směr než původní. Také se zejm. u pístu nepotvrdilo, že pro kvalitní demagnetizaci je nutný určitý počet cyklů.

Většinu těchto jevů lze vysvětlit na základě deformace teoreticky nastaveného průběhu, která je způsobena vlastnostmi použitého generátoru a zesilovače.

K největší deformaci průběhu proudu zpravidla docházelo na jeho začátku, kdy mělo dojít k prudkému nárůstu jeho hodnot, ale v realitě byl nárůst pouze pozvolný a nesymetrický – nebylo však zjištěno, že by to mělo zásadní vliv na kvalitu demagnetizace.

Všechny zde prezentované výsledky byly získány v módu amplitudová modulace, ve kterém bylo možné snadno nastavovat požadované průběhy, ale po jejich proběhnutí stále docházelo ke generaci určitého napětí, což spolu s vlastnostmi zesilovače způsobovalo, že na výslednou remanenci měla zásadní vliv polarita zapojení.

Opačná výsledná magnetická indukce byla u obvodu reometru vysvětlena právě vlivem polaritu zapojení. U magneticky měkkého pístu bylo zjištěno, že na výslednou remanenci má větší vliv poslední dostatečně velká amplituda proudu.

Pozitivní vliv většího počtu cyklů zřejmě nebyl pozorován, protože výše popsané deformace měly větší dopad a při vyšších frekvencích byl dominantní negativní efekt vířivých proudů – ten byl potvrzen tím, že při 20 a 50 Hz byly výsledky při stejné amplitudě proudu vždy horší než při nižších frekvencích (kromě 2 Hz u pístu).

Co se týká dalších nastavovaných parametrů, nebyla zjištěna výhodnost trojúhelníkového průběhu oproti harmonickému, protože soustava použitých přístrojů jej generovala značně zdeformovaný. Nebyla ani zjištěna výhoda exponenciálního poklesu oproti přímkovému, protože i při přímkovém docházelo k rovnoměrnému poklesu magnetické indukce (s výjimkou velkých frekvencí na obvodu reometru, kde vířivé proudy průběh magnetické indukce naprosto deformovaly). Proto byl zvolen harmonický průběh s lineárním poklesem, který je nejsnadněji generovatelný.

Dále bylo zjištěno, že při maximální amplitudě 1,5 A již může dojít ke kvalitnímu odmagnetování, ale prakticky vždy při stejných ostatních parametrech k menšímu než při 2,5 A. V případě požadavku na nejrychlejší možné odmagnetování je tedy lepší amplituda 2,5 A, ale z hlediska energetického a ekonomického může být někdy výhodnější amplituda 1,5 A.

Píst byl nejrychleji odmagnetován za 0,5 sekundy. Vzhledem k pomalému náběhu se zvolenou aparaturou nemělo smysl zkoumat kratší průběhy, ale dá se předpokládat, že díky dobrým vlastnostem pístu je možné jej odmagnetovat i rychleji.

Magneticky tvrdší a rozměrnější obvod reometru se nezdařilo odmagnetovat rychleji než za 2 sekundy, což potvrdilo, že z hlediska demagnetizace mají různé vzorky velmi odlišné vlastnosti.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo nalezení rychlé metody odmagnetování pístu magnetoreologického tlumiče. Pro ověření a porovnání výsledků byla taková metoda hledána i pro magnetický obvod MR viskozimetru, který měl odlišné elektrické a magnetické parametry.

Vlivem vlastností použitých přístrojů docházelo k podstatným deformacím požadovaných průběhů, takže není zaručena opakovatelnost výsledků experimentů s jiným zdrojem demagnetizačního proudu. Výhodou však je, že mohly být zkoumány různé vlivy přesného tvaru průběhu na konečnou remanenci. To bylo také umožněno přesnou měřicí technikou, která navíc vysokofrekvenčně zaznamenávala všechny veličiny (10 000 hodnot za sekundu).

Nakonec byly zjištěny vhodné parametry, při kterých došlo k rychlému a kvalitnímu odmagnetování. Jistou komplikací je, že musí být kontrolována polarita zapojení, protože jen při „správné“ dojde k odmagnetování. Další nevýhodou je, že v režimu amplitudové modulace je nutné generátor ovládat tak, že po proběhnutí demagnetizace je nutné přepnout modulační křivku, což během experimentů ovládal program na PC a ručně na ovládacím panelu generátoru je to obtížné.

Celkově však lze tvrdit, že byly nalezeny metody rychlého odmagnetování jak pístu, tak magnetického obvodu reometru, a navíc byl poměrně důkladně prozkoumán vliv jednotlivých parametrů průběhu proudu na výslednou remanenci.

Pro dokonalejší a rychlejší odmagnetování bude třeba použít kvalitnější zesilovač, který bude přesněji sledovat požadované průběhy proudu včetně prudkého náběhu. Dále bude nutné zajistit, aby generátor neměl po proběhnutí demagnetizačního cyklu na výstupu offset, a v případě zjištění výhodnosti trojúhelníkového průběhu bude nutné, aby ani generátor nedeformoval jeho průběh.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Nechte s námi opravit nejhorší díry v republice. *Cestování v bezpečí* [online]. 2014 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://cestovanivbezpeci.cz/?p=1239>
- [2] *Automotive suspension control system with vehicle speed-dependent damping characteristics* [patent]. United States Patent, US4616848 A. Uděleno 14.10.1986. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/US4616848>
- [3] FENGCHEN, Tu. Experimental Study and Design on Automobile Suspension Made of Magneto-Rheological Damper. *Energy Procedia* [online]. 2012, č. 16 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212000781>
- [4] GUGLIELMINO, Emanuele. *Semi-active suspension control: improved vehicle ride and road friendliness*. London: Springer, c2008, xvi, 294 p. ISBN 978-184-8002-319.
- [5] WERELEY, Norman. *Magnetorheology: advances and applications*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2013, xiii, 396 pages. ISBN 18-497-3667-7.
- [6] BECKER, Will. Smart fluid on state. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2015 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smart_fluid_on_state.jpg
- [7] BECKER, Will. Smart fluid off state. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2015 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smart_fluid_off_state.jpg
- [8] MCCLOSKEY, Joseph F. U.S. OPERATIONS RESEARCH IN WORLD WAR II. *Operations Research* [online]. 1987, roč. 35, č. 6, s. 910-925 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/219161537>
- [9] TRUSKALO, Walter. Resonant Degaussing for TV and High Definition Color Monitors. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* [online]. 1986, CE-32, issue 4, s. 713-722 [cit. 2015-04-10]. DOI: 10.1109/TCE.1986.290164. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4071476>
- [10] Odhalte tajemství demagnetizace: Zvyšuje životnost a kvalitu vašich produktů, produktivitu práce a snižuje náklady. *KOVOINZERT*. 2014, XVII., č. 2. Dostupné z: <http://www.floowie.com/cs/cti/kovo-2-2014/undefined#/strana/36/zvacseni/250/>
- [11] Metglas® 2714A Magnetic Alloy. In: *Metglas®* [online]. © 2003 - 2015 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: http://metglas.com/products/magnetic_materials/2714a.asp
- [12] FURLANI, Edward P. *Permanent magnet and electromechanical devices: materials, analysis, and applications*. San Diego, Calif.: Academic, c2001, xvii, 518 p. Electromagnetism. ISBN 01-226-9951-3.
- [13] LIVSHITZ, Boris a Jason S. GOLDBERG. Degaussing of Write Heads in Perpendicular Magnetic Recording. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2011, vol. 47, issue 10, s. 3403-3406 [cit. 2015-04-12]. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2153830. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6028010>

- [14] OXLEY, P. Apparatus for Magnetization and Efficient Demagnetization of Soft Magnetic Materials. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2009, vol. 45, issue 9, s. 3274-3283 [cit. 2015-04-12]. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2020795. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5208585>
- [15] SHAHVAROOGHI, A. a A.J. MOSES. High-speed computerised dc magnetisation and demagnetisation of mild steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 1994, vol. 133, 1-3, s. 386-389 [cit. 2015-04-13]. DOI: 10.1016/0304-8853(94)90573-8. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0304885394905738>
- [16] THIEL, F., A. SCHNABEL, S. KNAPPE-GRNEBERG, D. STOLLFU a M. BURGHOFF. Proposal of a Demagnetization Function. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2007, vol. 43, issue 6, s. 2959-2961 [cit. 2015-04-17]. DOI: 10.1109/TMAG.2007.893717. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4202944>
- [17] TAGAWA, I., T. KOSHIKAWA a Y. SASAKI. High performance write head for 10 krpm HDD with high data rate recording up to 45 MB/s. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2002, vol. 36, issue 1, s. 177-182 [cit. 2015-04-13]. DOI: 10.1109/20.824445. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=824445>
- [18] MERCORELLI, Paolo. A Two-Stage Augmented Extended Kalman Filter as an Observer for Sensorless Valve Control in Camless Internal Combustion Engines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2012, vol. 59, issue 11, s. 4236-4247 [cit. 2015-04-13]. DOI: 10.1109/TIE.2012.2192892. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6177243>
- [19] SAPIŃSKI, Bogdan a Stanisław KRUPA. Efficiency improvement in a vibration power generator for a linear MR damper: numerical study. *Smart Materials and Structures* [online]. 2013-04-01, vol. 22, issue 4, s. 045011- [cit. 2015-04-13]. DOI: 10.1088/0964-1726/22/4/045011. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/22/i=4/a=045011?key=crossref.4fa402b8b8b76c97a93177f8ad17d377>

9 SEZNAMY OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK**9****9.1 Seznam obrázků**

9.1

Obr. 1 Nekvalitní asfaltový povrch silnice nižší třídy [1]	12
Obr. 2 MR kapalina v aktivním stavu [6]	13
Obr. 3 MR kapalina v pasivním stavu [7]	13
Obr. 4 B-H křivka magneticky měkkého (souvislá čára) a tvrdého (čárkovaně) materiálu [12]	15
Obr. 5 Schéma průběhu elektromagnetického odmagnetování v B-H grafu [13]	15
Obr. 6 Ukázka principů měření zbytkového magnetismu [13]	16
Obr. 7 Píst MR tlumiče Delphi	21
Obr. 8 Magnetický obvod MR viskozimetru	21
Obr. 9 Schéma měřicího řetězce	22
Obr. 10 Umístění sondy v magnetickém obvodu reometru	23

9.2 Seznam grafů

9.2

Graf 1 Příklad závislosti účinnosti demagnetizace na počtu reverzací [14]	17
Graf 2 Příklad závislosti účinnosti demagnetizace na frekvenci pole [14]	18
Graf 3 Příklad závislosti účinnosti demagnetizace na počáteční amplitudě [14]	18
Graf 4 Porovnání harmonické funkce při 6 Hz s trojúhelníkovou nosnou křivkou	24
Graf 5 Porovnání použitých modulačních funkcí	25
Graf 6 Trojúhelníkový průběh při 6 Hz a lineárním poklesu	26
Graf 7 $B(I)$ charakteristika obvodu reometru	27
Graf 8 Příklad trojúhelníkového průběhu na pístu při 6 Hz a 10 s	28
Graf 9 Harmonický průběh o 6 Hz s přímkovou modulací proudu na pístu	29
Graf 10 Harmonický průběh o 50 Hz s přímkovou modulací proudu na obvodu reometru	29
Graf 11 Porovnání remanence na pístu po jednotlivých tvarech průběhu	30
Graf 12 Průběh veličin při 2 Hz při odpojení obvodu reometru od zesilovače	31
Graf 13 Nerovnoměrný náběh proudu cívkou obvodu reometru při 9 Hz, 2,5 A a 10 s	32
Graf 14 Porovnání navržených náběhů	32
Graf 15 Porovnání opačných zapojení při 10s poklesech	33
Graf 16 Nižší maximální amplitudy na obvodu reometru v porovnání s remanencí při 2,5 A	34
Graf 17 Porovnání nižší a standardní amplitudy na pístu	34
Graf 18 Remanence pístu při 2,5 A a harmonickém průběhu s přímkovou modulací	35
Graf 19 Průběh při 6 Hz a 0,5 s na pístu	36
Graf 20 Remanence obvodu reometru při 1,5 A a harmonickém průběhu s přímkovou modulací	37
Graf 21 Remanence obvodu reometru při 2,5 A a harmonickém průběhu s přímkovou modulací	37

9.3 Seznam tabulek

9.3

Tab. 1 Aplikace EM cívek a jejich indukčnost [9,17,18,19]	17
Tab. 2 Seznam použitých přístrojů	23
Tab. 3 Parametry zmagnetování	27

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

10.1 Seznam použitých zkratek

COM	- communication port (sériový port)
CRT	- cathode ray tube (katodová trubice)
HDD	- hard disk drive (pevný disk)
IIR	- infinite impulse response (filtr s nekonečnou impulzní odezvou)
MR	- magnetorheological (magnetoreologický)
PC	- personal computer (počítač)

10.2 Seznam použitých symbolů

B [T]	- magnetická indukce
H [A.m ⁻¹]	- intenzita magnetického pole
H_c [A.m ⁻¹]	- koercitivní síla
I [A]	- proud
L [H]	- vlastní indukčnost
t [s]	- čas
y [-]	- hloubka modulace
μ [N.A ⁻²]	- magnetická permeabilita
μ_0 [N.A ⁻²]	- magnetická permeabilita vakua
μ_r [N.A ⁻²]	- relativní magnetická permeabilita

11 SEZNAM PŘÍLOH

11

Příloha I – tabulky naměřených remanencí

Příloha II – ovládací skripty pro program MATLAB[®]